

Классификация программного обеспечения автоматизированного конструирования

В настоящее время все существующее программное обеспечение автоматизированного конструирования принято классифицировать по функциональной полноте. По этому признаку оно условно делится на три уровня.

1. К нижнему уровню относят программы, реализующие 2D модели в виде чертежей и эскизов, например, пакеты российских разработчиков БАЗИС-Конструктор 4.5 (Базис), Графика-81 (Институт проблем управления), SprutCAD (СПРУТ-Технологии), чертежно-графический редактор АРМ Graph (НИЦ АПМ), CADMECH и CADMECH LT на базе AutoCAD и AutoCAD LT2000 (Интермех), T-Flex CAD LT (Топ Системы), КОМПАС-ГРАФИК (Аскон), АДЕМ (Omega Technologies) и др.
2. На среднем уровне располагаются программные комплексы, которые позволяют создавать трехмерную геометрическую модель сравнительно несложного изделия в основном методом твердотельного моделирования. К числу этих программных комплексов можно отнести: AutoCAD 2000 и AMD (AutoDesk), Solid Works (Solid Works), Solid Edge (Unigraphics Solutions), PowerSHAPE (Delcam plc), Prelude Design (Matra Datavision), MicroStation (Bentley Systems), GeMMa-3D (GeMMa), T-Flex CAD 3D (Топ Системы), bCAD (ПроПро Группа), CREDO (НИЦ АСК), OceanCAD и др.
3. Наиболее мощные программные системы сквозного проектирования и производства расположены на верхнем уровне. Среди них можно выделить: CATIA5 (Dassault Systemes, Франция), EUCLID3 (EADS Matra Data-vision, Франция), UNIGRAPHICS (Unigraphics Solutions, США), Pro/ENGINEER и CADD5 (PTC, США).

С точки зрения CALS-технологий программное обеспечение автоматизированного конструирования должно удовлетворять не только требованию функциональной полноты. При выборе и установке той или иной конфигурации программного обеспечения важно учитывать специфику моделей и задач, решаемых на каждом рабочем месте. В этом случае вместо одного пакета с множеством универсальных функций должны устанавливаться строго специализированные пакеты программ, разработанные в соответствии с этими задачами.

В основе автоматизированного конструирования машиностроительных изделий лежит объемное моделирование. В этом случае на помощь конструктору при моделировании приходит как его собственный опыт, так и результаты работы других специалистов, воплощенные в рисунках, эскизах, чертежах, реально выполненными образцами изделий в материале, данные сканирования этих образцов и компьютерные геометрические модели ранее разработанных изделий.

Для создания объемной модели изделия конструктор может воспользоваться методом трехмерного твердотельного моделирования,

методом поверхностного моделирования или сочетанием этих методов в адаптивных формах.

Рассмотрим более подробно основные методы формообразования машиностроительных изделий и наиболее важные аспекты компьютерного моделирования, которые должны составлять основу подготовки инженера.

Объёмное моделирование твёрдого тела. Способы моделирования.

Инженеры и конструкторы имеют дело с математической (прежде всего - геометрической) моделью разрабатываемого изделия. Исторически первым и главным языком их общения (то есть языком описания инженерных моделей) был язык чертежей. Чертеж (и другие подобные графические схемы) широко использовался (и используется до сих пор) не только для описания механического изделия и его частей, но также и для описания электрических схем, архитектурных конструкций, карт местности и т. п. Четкие стандарты (как национальные, так и международные) гарантируют однозначное понимание языка чертежей всеми «читателями» - от инженера - конструктора до токаря, слесаря и фрезеровщика. Однако создание чертежей вручную - чрезвычайно дорогостоящая процедура, доступная только подготовленным специалистам и требующая использования специальной чертежной доски с линейкой - кульмана, а также разных вспомогательных средств (например, лекал для рисования кривых).

Неудивительно, что первые системы автоматизации в этой области были предназначены именно для упрощения и ускорения создания чертежей (подобно другой эпохальной концепции автоматизации с помощью компьютера - текстовым процессорам, предназначенным для упрощения создания текстовых документов и легкого внесения изменений в них). Системы класса computer aided drafting существуют и поныне, самый известных их представитель – AutoCAD. Типичная функциональность таких систем включает в себя средства, необходимые для создания и редактирования чертежей, а процесс работы концептуально не отличается от работы в графическом редакторе (основными понятиями графических моделей таких систем являются графические примитивы с атрибутами, отображаемые уровни, а также различные способы конструирования). В нашем курсе мы не будем рассматривать системы этого класса, так как в настоящее время они стремительно уступают свои позиции системам трехмерного моделирования (даже Autodesk делает основную ставку не на AutoCAD, а на Inventor Series). Дело в том, что с изобретением трехмерной компьютерной графики (возможности реалистического изображения трехмерной сцены на двумерном дисплее компьютера и ее вращения с помощью манипулятора «мышь» в воображаемом трехмерном пространстве) у инженеров появилась возможность работать напрямую с трехмерной геометрической моделью проектируемого изделия, а не с его двумерными чертежами.

Модель - такое представление данных, которое наиболее адекватно отражает свойства реального объекта, существенные для процесса

проектирования.

Геометрические модели описывают объекты, обладающие геометрическими свойствами.

Геометрическое моделирование - моделирование объектов различной природы с помощью геометрических типов данных.

Геометрическое моделирование оказалось настоящим прорывом в конструировании и производстве изделий. Оно не только значительно упрощает процесс проектирования (теперь инженер-конструктор не обязан обладать развитым пространственным мышлением или использовать подручные материалы типа пластилина - он видит проектируемое изделие непосредственно на экране), но снимает многие коммуникативные проблемы.

Геометрические модели в САПР используются для решения многих задач. В первую очередь они предназначены для хранения информации о форме объектов и их взаимном расположении и предоставления ее для обработки в удобном для компьютерной программы виде. В этом ключевое отличие электронной геометрической модели от чертежа, который представляет собой условное символично-графическое изображение, предназначенное для чтения человеком.

Представьте себе ребенка, который лепит что-то из пластилина. Малыш мнет пластилин, а иногда добавляет или отрывает кусочки, и постепенно приближается к конечному результату. Такую деятельность вполне можно назвать процессом проектирования, поскольку налицо детализация формы по мере развития идеи. Ребенок погружается в проектирование, не имея ни малейшего представления о технических чертежах, не умея пользоваться даже ручкой и бумагой. Если ребенок захочет передать результат другим, например, для прототипирования и массового производства, ему достаточно отдать реальный результат своих трудов, из которого можно будет извлечь всю необходимую информацию.

Системы геометрического моделирования были созданы для того, чтобы преодолеть проблемы, связанные с использованием физических моделей в процессе проектирования. Эти системы создают среду, подобную той, в которой создаются и изменяются физические модели. Другими словами, в системе геометрического моделирования разработчик изменяет форму модели, добавляет и удаляет ее части, детализируя форму визуальной модели таким же образом, как ребенок формирует фигурку из пластилина. Визуальная модель может выглядеть точно так же, как физическая, но она нематериальна. Однако трехмерная визуальная модель хранится в компьютере вместе со своим математическим описанием, благодаря чему устраняется главный недостаток физической модели - необходимость выполнения измерений для последующего прототипирования или серийного производства.

За последние пятьдесят лет было разработано множество способов геометрического моделирования, которые мы разберем детально ниже.

Типы (способы) объёмного моделирования

Хронологически различают следующие подходы к геометрическому моделированию:

- каркасное моделирование;
- поверхностное моделирование;
- твердотельное моделирование;
- гибридное моделирование.

Каркасное моделирование - это исторически первая технология представления объемной геометрии. Она естественным образом развилась из систем 2D-черчения. Это самый простой способ представления трехмерных моделей - так называемые проволочные каркасы, или просто каркасы, которые дают неоспоримые преимущества по сравнению с моделированием на плоскости. Они помогают более ясно представлять модель и надежно контролировать взаимное расположение составляющих ее элементов. Кроме того, каркасы можно использовать и для создания проекционных видов. Достаточно простые структуры данных и алгоритмы работы с каркасами позволили реализовать их на маломощном оборудовании конца 70-х годов XX века.

В *системах каркасного моделирования (wireframe modeling systems)* форма представляется в виде набора характеризующих ее линий и конечных точек. Линии и точки используются для представления трехмерных объектов на экране, а изменение формы осуществляется путем изменения положения и размеров отрезков и точек. Другими словами, визуальная модель представляет собой каркасный чертеж формы, а соответствующее математическое описание представляет собой набор уравнений кривых, координат точек и сведений о связности кривых и точек. Сведения о связности описывают принадлежность точек к конкретным кривым, а также пересечение кривых друг с другом. Системы каркасного моделирования были популярны в ту пору, когда геометрическое моделирование только начало зарождаться. Их популярность объяснялась тем, что в системах каркасного моделирования создание форм выполнялось через последовательность простых действий, так что пользователям было достаточно легко создавать формы самостоятельно.

Недостаток каркасного представления моделей состоит в том, что программы не могут отобразить всех особенностей поверхностей, определяемых каркасами, и это делает невозможным построение, например, точных сечений. Визуальное представление достаточно аскетичное и в ряде случаев не дает возможности однозначно интерпретировать увиденное (рисунок 2.1).

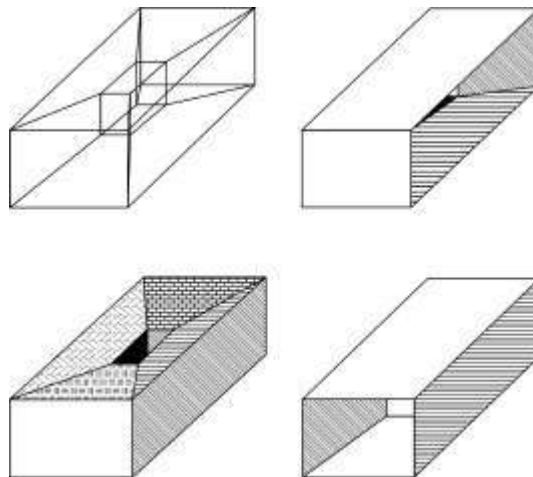


Рисунок 2.1 - Неоднозначные каркасные модели

Тем не менее даже такая, имеющая множество ограничений технология позволила существенно расширить функциональные возможности САПР по сравнению с 2D -системами. Более того, соответствующее математическое описание не содержит сведений о внутренних и внешних поверхностях моделируемого объекта. Без этих сведений невозможно рассчитать массу объекта, определить траектории перемещения инструмента при обработке объекта или создать сетку для конечно-элементного анализа, несмотря на то что объект кажется трехмерным. Поскольку эти операции являются неотъемлемой частью процесса проектирования, системы каркасного моделирования были постепенно вытеснены системами поверхностного и твердотельного моделирования.

В настоящее время построение каркасов также используется в геометрическом моделировании САПР, но лишь как вспомогательная система промежуточных построений (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 - Каркасная модель теоретических обводов космического корабля Буран

Поверхностное моделирование

В отличие от каркасного представления, моделирование при помощи поверхностей имеет существенно меньше ограничений, так как позволяет определить своеобразную «оболочку» трехмерного объекта (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 - Поверхностная модель теоретических обводов космического корабля Буран

Геометрические модели на основе поверхностного представления обеспечивают качественную визуализацию, более простой переход к построению расчетных сеток для численного моделирования, обеспечивают ряд полезных функций, таких как построение пространственных сопряжений, сечений, определения линии пересечения оболочек, генерацию чертежных проекций.

Поверхностные модели различаются по способу аппроксимации поверхности. Более простой в части структуры данных и используемых для работы с ними алгоритмов является *полигональная* аппроксимация, когда поверхность представляется набором взаимосвязанных плоских граней, на практике чаще всего треугольных. Такая аппроксимация легко строится, для нее разработаны эффективные алгоритмы реалистичной визуализации, она не требует значительных вычислительных ресурсов, хотя может быть и затратной по памяти.

Главным ограничением подобной аппроксимации является то, что она имеет фиксированную точность, то есть отклонение положения модельной поверхности от «идеальной» моделируемой. Для достижения высокой точности требуется создание сеток с малым шагом, что ведет к росту требований к вычислительным возможностям системы. Поэтому использование полигональной аппроксимации в САПР на текущий момент ограничено подсистемами визуализации и простейшего 3D-эскизирования.

Этих недостатков лишена технология NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline, неоднородный B-сплайн), сегодня наиболее часто используемая в практике САПР.

Такое описание поверхности обеспечивает определение координат любой ее точки, радиуса кривизны в ней, направления нормали к поверхности с высокой, в общем случае (без учета вычислительных затрат) с любой наперед

заданной точностью.

Определенным недостатком такого подхода является сложность алгоритмов работы с NURBS, однако это обстоятельство исторически преодолено исследователями и разработчиками.

В определенной степени NURBS-представление является развитием полигонального, но в отличие от него позволяет описывать не только плоские, но и криволинейные грани и ребра (кромки). Совокупность таких граней с общими ребрами по традиции называют сеткой.

Технология NURBS обеспечивает реализацию ряда функциональных возможностей, недоступных или существенно ограниченных при использовании каркасного либо полигонального представления: вычисление радиуса кривизны поверхностей, их гладкое сопряжение, построение траекторий на поверхности, что важно для подготовки ЧПУ- программ, получение точных изображений, спроецированных на плоскость, например, для получения чертежных видов и т. д. и т. п.

Поверхностное моделирование играет важную роль при проектировании изделий из листового металла (sheet metal parts), таких как капоты и крылья автомобилей, где форма поверхности важна как для дизайна, так и для аэродинамики изделия (рисунок 2.4).

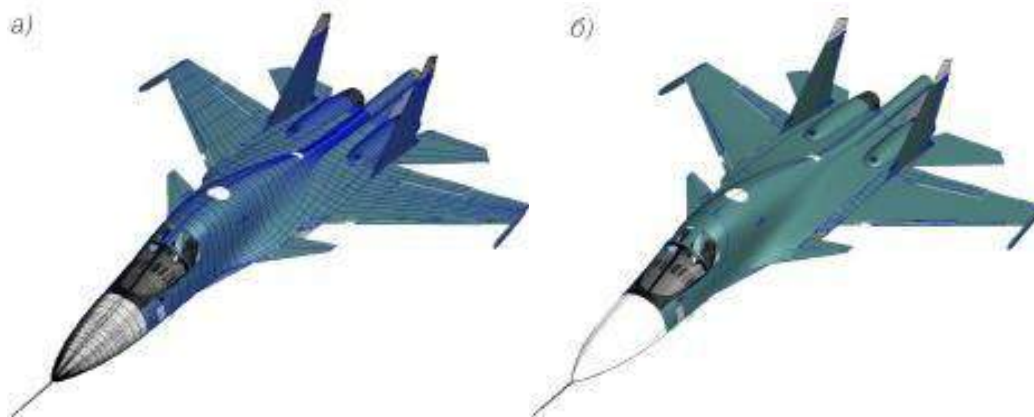


Рисунок 2.4 - Аппроксимация теоретических обводов самолета: а) полигональная и б) NURBS-аппроксимация

Традиционно используются несколько типовых **контекстов создания поверхностей**:

- плоская поверхность - получается заполнением плоского контура (2D-эскиз или набор замкнутых кромок, лежащих в одной плоскости);
- поверхность вытяжки - образуется в результате плоскопараллельного вытягивания замкнутого или разомкнутого 2D/3D-эскиза в направлении, перпендикулярном плоскости эскиза, или под произвольным углом;
- поверхность вращения - получается вращением произвольного профиля (2D -эскиз) относительно оси;
- поверхность по траектории - создается движением 2D/3D эскиза вдоль криволинейной образующей (2D/3D-эскиз, 3D-кривая) и произвольного числа направляющих кривых (2D/3D - эскиз, 3D - кривая), деформирующих исходный контур;

-поверхность по сечениям - аналог поверхности по траектории; отличается тем, что строится не по одному, а по нескольким поперечным сечениям с направляющими кривыми;

-граничная поверхность - аналог поверхности по сечениям; отличается тем, что строится по нескольким произвольно сориентированным в пространстве 3D-кромкам других поверхностей с сохранением касательности к ним и с соблюдением непрерывности по второй производной (гладкая стыковка); при построении могут использоваться направляющие кривые;

-поверхность свободной формы - строится разбиением сетки с управляющими точками на поверхности грани 3D-модели; изменение формы поверхности достигается перетаскиванием контрольных точек;

-эквидистантная поверхность - получается смещением на определенное расстояние от существующих граней или поверхностей;

-поверхность разъема - используется при проектировании литейных форм, а также в качестве вспомогательной геометрии для разделения матрицы и пуансона;

-срединная поверхность - создается на середине (или заданном проценте) толщины тонкостенной детали;

-линейчатая поверхность - строится под углом к выбранной кромке и предназначена для построения граней с уклоном.

В том случае, если установлена программная связь между вспомогательным каркасом и результирующей поверхностью, моделирование становится *ассоциативным*, при этом изменение каркасных элементов ведет к автоматическому изменению геометрии поверхностей, построенных с использованием этого контекста.

В *системах поверхностного моделирования (surface modeling systems)* математическое описание визуальной модели включает в себя не только сведения о характеристических линиях и их конечных точках, как в каркасном моделировании, но и данные о поверхностях. При работе с отображаемой на экране моделью изменяются уравнения поверхностей, уравнения кривых и координаты конечных точек. Если поверхности не окрашены и не затушеваны, визуальная модель в системе поверхностного моделирования может выглядеть точно так же, как в системе каркасного моделирования.

Математическое описание может включать сведения о связности поверхностей, то есть о том, как поверхности соединяются друг с другом и по каким кривым. В некоторых приложениях эти сведения оказываются очень полезными. Например, программа для формирования траектории перемещения фрезы с ЧПУ может воспользоваться этой информацией для проверки, не задевает ли фреза поверхности, примыкающие к обрабатываемой.

Существует **три стандартных метода** создания поверхностей в системах поверхностного моделирования.

1. Интерполяция входных точек.
2. Интерполяция криволинейных сеток.
3. Трансляция или вращение заданной кривой.

Способы ввода для каждого метода могут зависеть от конкретной системы поверхностного моделирования. Однако базовый метод ввода для каждой системы легко определить по представлению кривых и плоскостей.

Системы поверхностного моделирования используются для создания моделей со сложными поверхностями, потому что визуальная модель позволяет оценить эстетичность проекта, а математическое описание позволяет построить программу для обработки поверхностей детали на станке с ЧПУ.

Несмотря на достаточно широкие возможности, которые предоставляет поверхностное моделирование, оно имеет ряд существенных ограничений с точки зрения использования в САПР, в частности невозможность вычисления объемов, масс и моментов инерции объектов, ограниченность применения к ним булевых операций (вычитания, объединения, пересечения).

Твердотельное (объемное) моделирование-логическое развитие каркасного и поверхностного. Основной объект моделирования - трехмерное объемное тело, которое может описываться разными способами: декомпозиционным, конструктивным или граничным. Мы разберем их подробнее ниже. Главным преимуществом твердотельного моделирования перед каркасным и поверхностным является свойство физической корректности - все твердотельные модели имеют аналоги в реальном мире (чего не скажешь о каркасных и поверхностных моделях).

При использовании твердотельного моделирования, ставшего на сегодня стандартом де-факто в 3D CAD/CAM/CAE-системах, снимаются ограничения поверхностного моделирования.

Системы твердотельного моделирования (solid modeling systems) предназначены для работы с объектами, состоящими из замкнутого объема, или *монолита (solid)*. В системах твердотельного моделирования, в отличие от систем каркасного и поверхностного моделирования, не допускается создание наборов поверхностей или характеристических линий, если они не образуют замкнутого объема. Математическое описание объекта, созданного в системе твердотельного моделирования, содержит сведения, по которым система может определить, где находится какая-либо точка: внутри объема, снаружи него или на его границе. По этим сведениям, можно получить любую информацию об объеме тела, а значит, могут быть написаны приложения, работающие с объектом на уровне объема, а не на уровне поверхности.

Если бы система твердотельного моделирования требовала ввода всех данных для полного математического описания, она была бы слишком сложной для пользователей, и они отказались бы от нее. Процесс детализации формы не был бы похож на интуитивный процесс физического моделирования, и в результате получилось бы совсем не то, на что рассчитывали создатели систем геометрического моделирования. Поэтому разработчики систем твердотельного моделирования стараются предоставить простые и естественные функции, чтобы пользователи могли работать с объемными формами точно так же, как они работают с физическими моделями, не вдаваясь в подробности математического описания. Функции

моделирования, подобные созданию примитивов, булевым операциям, вытягиванию, построению фигуры вращения, повороту и скруглению, требуют от пользователя совсем немного. Обо всех деталях математического описания системы заботятся сами.

Существуют различные алгоритмические методы представления твердотельных моделей:

- декомпозиционные модели;
- конструктивные модели;
- граничные модели

Декомпозиционные модели являются простейшим подходом к твердотельному моделированию, представляя трехмерное тело композицией некоторых простых элементов. Различают следующие декомпозиционные модели:

- воксельное (voxel) представление;
- октантное дерево;
- ячеечное представление.

Воксельное представление - полный трехмерный аналог растрового одноцветного изображения. Тело представляется трехмерным булевым массивом, каждый элемент которого является пространственным кубиком одинакового размера со своими уникальными координатами. Такой кубик называется вокселем (voxel - от VOlume piXEL). Воксели (рисунок 2.5) равномерно покрывают всю область (тор), в которой содержится моделируемое тело. Отметим удобство воксельного представления для реализации на его основе булевых операций твердотельного моделирования. Для этого необходимо построить согласованные воксельные представления двух тел и применить соответствующую операцию к булевым значениям ячеек массива.

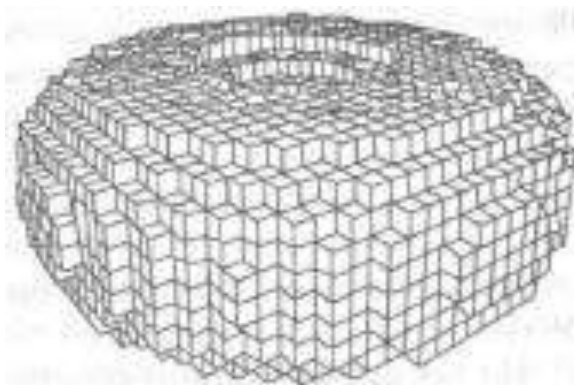


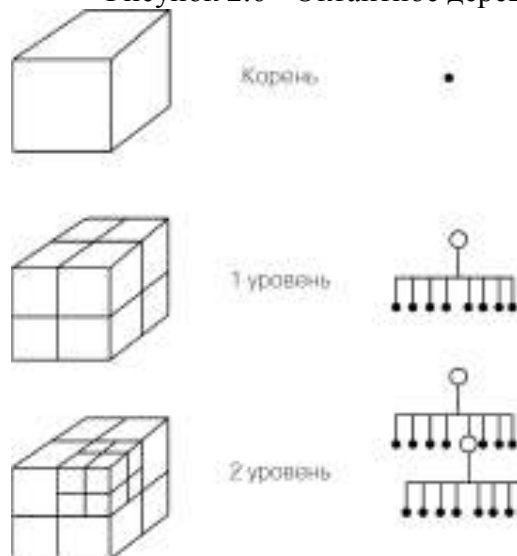
Рисунок 2.5 - Воксельное представление тора

Сложность такого алгоритма будет прямо зависеть от числа вокселей. На воксельном представлении несложно вычислять объемные параметры тела - достаточно лишь вычислить их аналитически для каждого вокселя и просуммировать.

Октантное дерево является развитием воксельного представления. Каждый узел октантного дерева соответствует некоторому кубу в трехмерном пространстве, который является либо:

- полностью (с заданной точностью) принадлежащим описываемому телу;
- полностью не принадлежащим описываемому телу;
- частично пересекающимся с описываемым телом. Первые два типа узлов - терминальные (листья в октантном дереве), а каждый узел третьего типа обязательно имеет 8 дочерних узлов, соответствующих геометрическому разбиению его куба на 8 частей (октантов) (рисунок 2.6).

Рисунок 2.6 - Октантное дерево



Ячеечное представление соответствует разбиению моделируемого тела на произвольные непересекающиеся выпуклые многогранники, полностью (в соответствии с заданной погрешностью) заполняющие его объем.

Конструктивные модели основаны на применении операций твердотельного моделирования. Для создания конструктивной модели, модели CSG (constructive solid geometry) реализуют конструктивный подход в терминах булевых операций над параметрическими твердотельными примитивами (прямоугольный параллелепипед, цилиндр и пр.).

В рамках CSG представления для описания составных твердых тел определены следующие операции (рисунок 2.7) над исходными (а) элементарными телами:

- вычитание (б);
- объединение (в);
- пересечение (г).

Таким образом, любое составное тело может быть описано в виде традиционного уравнения из булевых функций, в котором аргументами являются либо элементарные тела, либо другие составные тела. Это представление называют деревом построений (рисунок 2.8).

Такое представление, кроме удобства модификации геометрии результирующего тела, позволяет существенно снизить требования к вычислительным ресурсам за счет применения оптимизирующих процедур к дереву построений. Представление твердых тел в виде дерева построений удобно также и с точки зрения организации пользовательского интерфейса,

обеспечивающего наглядный и быстрый доступ к любому элементу, входящему в описание геометрии тела, его модификацию и получение отчетной информации.

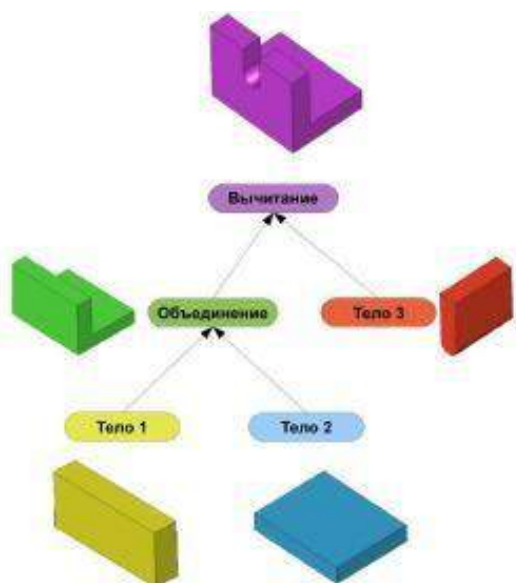
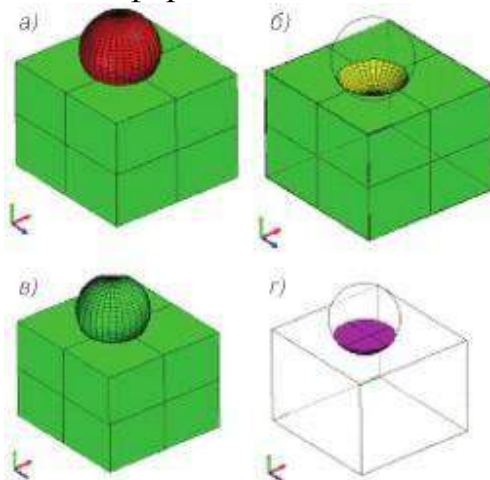


Рисунок 2.7 - Булевы операции над простыми твердыми телами

Рисунок 2.8 - Дерево построения составных твердых тел

Граничные модели

Твердое тело (рисунок 2.9) образуется в пространстве одной или несколькими поверхностями, образующими замкнутый объем. Оно включает в себя *границы*, *ребра* (или кромки) и *вершины*. **Грань** – часть граничной поверхности, образующей тело, граница которой состоит из криволинейных сегментов, при пересечении которых происходит существенное изменение вектора нормали к поверхности, т.е. нарушается непрерывность изменения кривизны поверхности (рисунок 2.10). Криволинейные сегменты, ограничивающие грань, называются **ребрами**. Точки, в которых встречаются соседние ребра, называются **вершинами**.

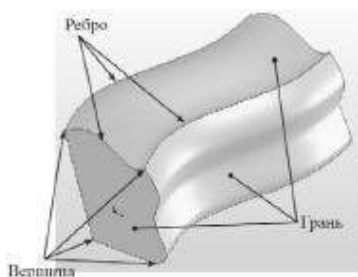


Рисунок 2.9 - Твердое тело поверхности



Рисунок 2.10 - Грани, ребра и нормали к

Граничные модели хранят информацию о границах тела (гранях, ребрах и вершинах). Для простоты манипулирования эта информация подразделяется на геометрические и топологические данные.

Геометрические данные для каждой граничной сущности свои:

- для вершины - ее координаты;
- для ребра - параметрическое уравнение кривой (прямой);
- для грани - параметрическое уравнение поверхности либо тип и набор параметров в случае канонической поверхности (плоскости, сферы, цилиндра, конуса, тора).

Топологические данные - это информация о смежности вершин и ребер, ребер и граней, а также о внутренних и внешних границах грани. Для удобного манипулирования топологической информацией было предложено несколько структур данных, называемых

BRep (Boundary Representation):

- многогранные (фасетные) модели;
- вершинные модели;
- полурёберные модели;
- крыльевые рёберные модели.

Разберем одну из самых популярных структур – полурёберную, основанную на том простом факте, что каждое ребро границы твердого тела принадлежит ровно двум граням (рисунок 2.11).

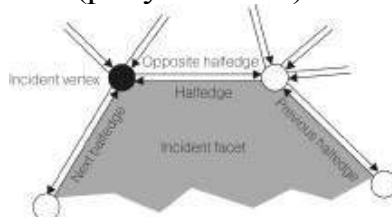


Рисунок 2.11 - Полурёберная модель

Структура данного представления такова:

- список тел (solid), каждое тело состоит из списка его граней (faces), ребер (edges) и вершин (vertices);
- грань состоит из колец (loop), представляющих собой внешнюю границу грани, а также ее опциональные внутренние границы;
- кольцо состоит из списка полурёбер (halfedges);
- полуребро указывает на начальную вершину и следующее полуребро, а также на свое ребро;

- ребро хранит указатели на два своих полуребра.

Одним из достоинств граничной модели является удобный способ расчета ее объемных параметров.

В практике САПР наиболее широкое применение имеет технология, базирующаяся на граничном представлении элементарных односвязных тел (BRep, Boundary Representation) в совокупности с конструктивной геометрией (CSG, Constructive solid geometry), описывающей операции над телами.

Граничное представление определяет сплошное тело неявно путем описания ограничивающей его поверхности. Суть BRep-представления заключается в том, что твердое тело описывает замкнутая пространственная область, ограниченная набором элементарных тонких поверхностей (граней) с общими образующими контурами (ребрами) на границе поверхностей и признаком внешней или внутренней стороны поверхности (рисунок 2.12), а также обеспечивающим следующий ряд операций, определенных над телами:

-проверка правильности задания, для односвязных тел осуществляется по формуле Эйлера, в наиболее общем виде записываемой как:

$$V - E + F = 2,$$

где **V**-количество вершин, **E**- количество ребер, **F** - количество граней;

- вычисление габаритного объема;
- вычисление нормали в точке;
- вычисление кривизны поверхности;
- нахождение точки пересечения с контуром или другой поверхностью;
- определение положения точки относительно поверхности.

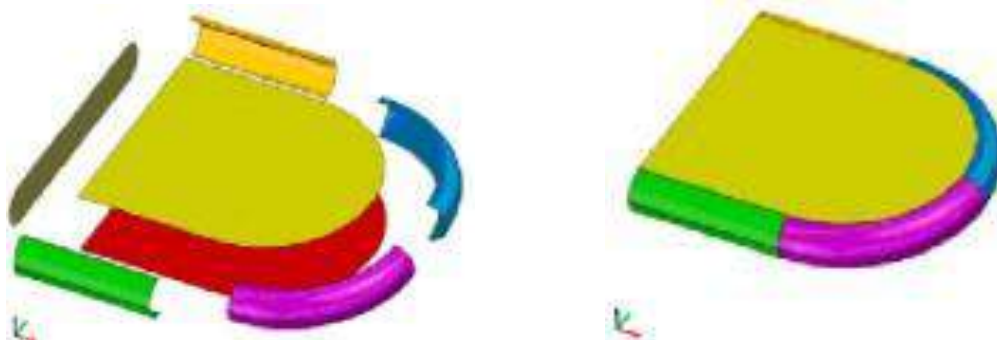


Рисунок 2.12 - BRep-представление простых твердых тел

Для описания сложных тел, моделирующих объекты реального мира, получаемые обработкой материала или неразъемной сборкой, используется иерархическая структура, описывающая тела как последовательность применения булевых операций над набором элементарных твердых тел - так называемое CSG-дерево (Constructive Solid Geometry tree) (рисунок 2.13, см. также рисунок 2.8).

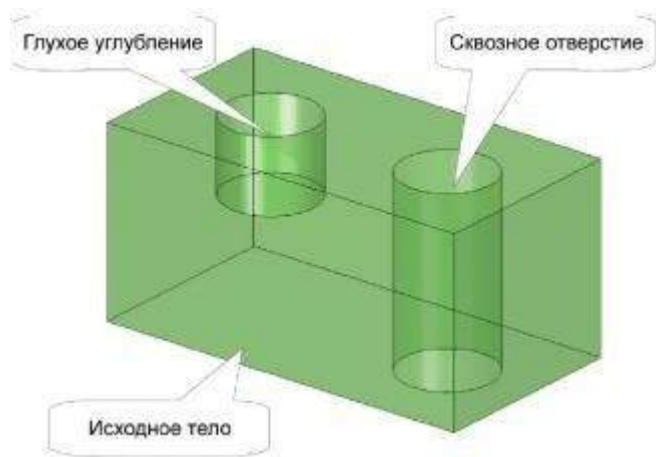


Рисунок 2.13 - BRep-представление сложных твердых тел

Так же как и для элементарного тела, правильность построения определяется формулой Эйлера, записываемой для многосвязных тел в частном виде:

$$V - E + F - H = 2(C - G),$$

где V - количество вершин, E - количество ребер, F - количество граней, H - количество несквозных отверстий, C - количество компонент, G - количество сквозных отверстий.

Гибридное моделирование снимает ограничения, присущие классическому твердотельному моделированию: с его помощью можно описывать геометрические модели, которые локально могут быть не только многообразиями размерности три (объемными телами), но и размерности два (поверхностями), один (кривыми), нуль (точками), а также участками сопряжения многообразий разной размерности.

Лекция 14. Функции твёрдотельного моделирования. Кривые линии

Функции моделирования, поддерживаемые большинством систем твердотельного моделирования, могут быть разделены на пять основных групп.

В первую группу входят функции, используемые для создания простых форм на основе объемных заготовок, имеющихся в программе, - так называемые *функции создания примитивов (primitive creation functions)*. К этой же группе относятся функции добавления и вычитания объема - *булевы операторы (Boolean operations)*. Функции моделирования из первой группы позволяют проектировщику быстро создать форму, близкую к окончательной форме детали, подобно тому, как ребенок сминает пластилин и создает из него приблизительную физическую модель.

Ко второй группе относятся функции создания объемных тел путем перемещения поверхности. Функция *заметания (sweeping)* позволяет

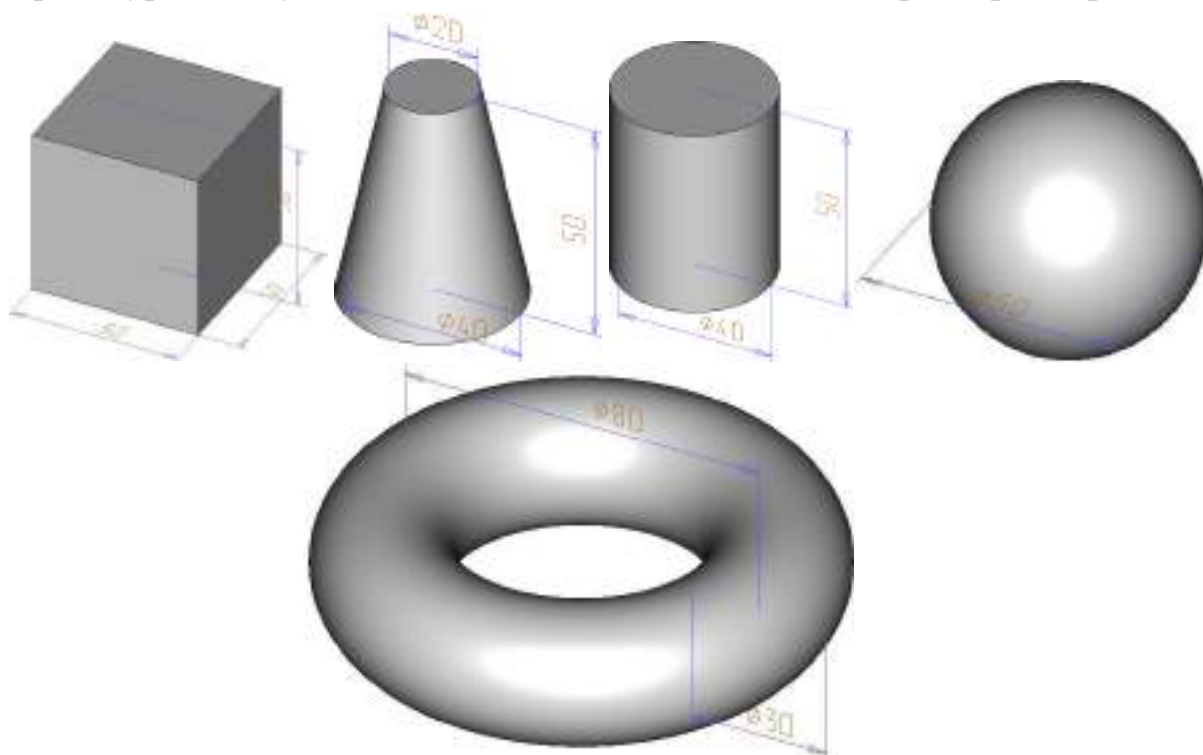
создавать объемное тело трансляцией или вращением области, заданной на плоскости. Построение тела вращения из плоской кривой называется также *качанием* или *вращательным заметанием (swinging)*. Задавая замкнутую плоскую область, пользователь может указывать геометрические ограничения или вводить данные о размерах, а не рисовать форму вручную. Здесь под геометрическими ограничениями понимаются соотношения между элементами рисунка (перпендикулярность отрезков, касание дуги окружности отрезком и т. д.). В этом случае система построит точную форму, удовлетворяющую ограничениям, самостоятельно. Изменение геометрических ограничений или размеров даст другую плоскую область и другое объемное тело. Такой подход называется параметрическим моделированием, поскольку изменение параметров позволяет получить разные объекты. Параметрами могут быть постоянные, входящие в геометрические ограничения, а также размеры. Функция *скиннинга (skinning)* создает объемное тело, натягивая поверхность на заданные поперечные сечения. Функции второй группы позволяют проектировщику начать моделирование с формы, весьма близкой к конечному результату, поскольку одних поперечных сечений вполне достаточно для точного описания конечного объемного тела.

В третью группу входят функции моделирования, предназначенные главным образом для изменения существующей формы. Типичными примерами являются функции *скругления* или *плавного сопряжения (rounding, blending)* и *поднятия (lifting)*.

К четвертой группе относятся функции, позволяющие непосредственно манипулировать составляющими объемных тел, то есть вершинами, ребрами и гранями. Работа с этими функциями (аналогичными функциям систем поверхностного моделирования) называется *моделированием границ (boundary modeling)*.

В пятую группу входят функции, используя которые проектировщик может моделировать твердое тело при помощи свободных форм. Например, он может давать системе команды типа «сделать отверстие такого-то размера в таком-то месте» или «сделать фаску такого-то размера в таком-то месте». Работа с такими функциями называется *объектно-ориентированным моделированием (feature-based modeling)*. В последнее время функциям пятой группы уделяется особое внимание, поскольку модель, построенная с их помощью, содержит информацию о процессе создания, без которой невозможно автоматическое формирование плана технологического процесса для детали. Заметьте, что модель, созданная другими средствами, содержит только элементарные геометрические сведения о вершинах, ребрах и гранях.

1. Функции создания примитивов позволяют выбирать и создавать простейшие объекты, заранее определенные авторами системы моделирования. Размер примитива задается пользователем. Примитивы, поддерживаемые большинством систем твердотельного моделирования, показаны на рисунке 3.1. Размеры, указанные на этом рисунке, могут устанавливаться пользователем. Примитивы сохраняются в базе данных процедурой, осуществляющей их создание, а параметры примитивов



передаются этой процедуре в качестве аргументов.

Рисунок 3.1 - Типичные примитивы

Булевы операции. Если бы в списке примитивов можно было найти любое объемное тело, это было бы замечательно. Однако из-за разнообразия возможных применений систем геометрического моделирования сохранить заранее все мыслимые формы невозможно. Гораздо проще приблизиться к решению, предоставив пользователю средства для комбинирования примитивов. В качестве метода комбинирования в твердотельном моделировании применяются булевы операции теории множеств. Другими словами, каждое примитивное объемное тело считается множеством точек, к множествам применяются булевы операции, а в результате получается объемное тело, состоящее из точек, полученных после преобразований.

Большинством систем твердотельного моделирования поддерживаются следующие булевы операции: объединение, пересечение и разность (рисунки 3.2, 3.3 и 3.4 соответственно). До применения булевых операций необходимо определить относительное положение и ориентацию примитивов. Булевы операции могут применяться не только к примитивам, хотя на рисунках в качестве примеров изображены именно примитивы.

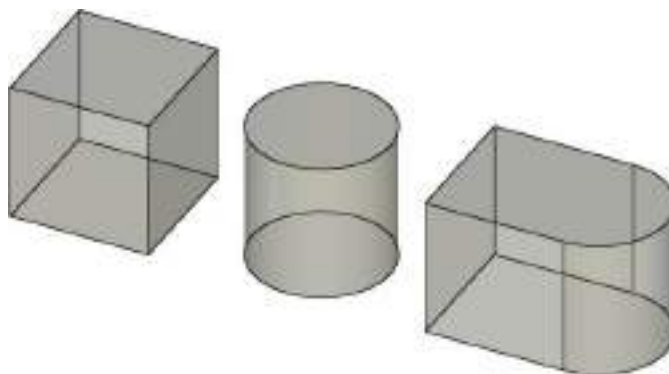


Рисунок 3.2 - Объединение примитивов

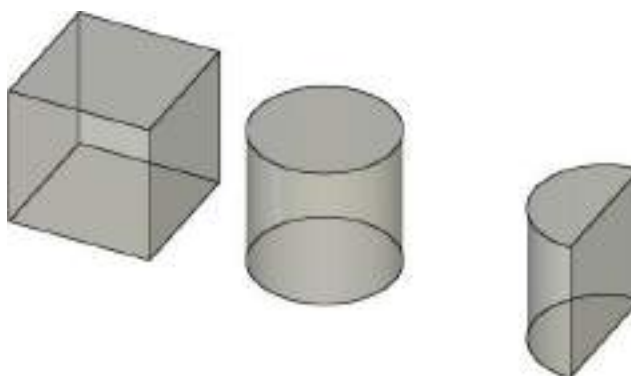


Рисунок 3.3 - Пересечение примитивов

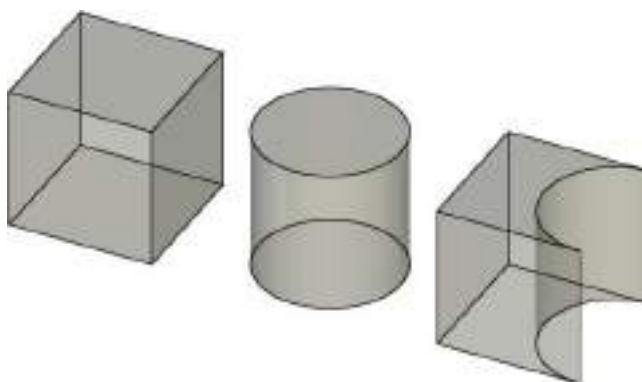
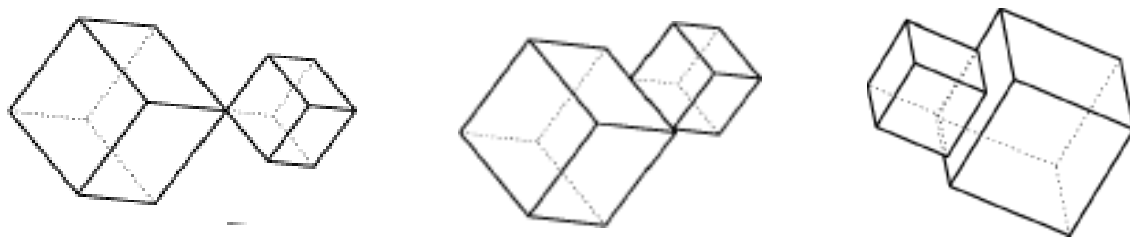


Рисунок 3.4 - Разность примитивов

Еще одна функция моделирования реализуется подобно булевым операциям, это функция разрезания объемного тела плоскостью, после применения которой случается тело из двух частей. Того же результата можно достичь, применив операцию вычитания к объемному телу, которое должно быть разрезано, и кубу, одной из граней которого является секущая плоскость.

По этой причине функция разрезания также может быть отнесена к булевым операциям.

При использовании булевых операций следует быть внимательным, чтобы не получить в результате тело, не являющееся объемным (рисунок 3.5). Некоторые системы выдают предупреждение о возможности получения некорректного результата, другие могут просто завершить работу с сообщением об ошибке. Системы гибридного (немногообразного) моделирования способны обрабатывать и такие специфические ситуации, поскольку они работают не только с объемными телами, но и с поверхностями



и каркасами.

Рисунок 3.5 - Некорректная булева операция

II. Заметание. Функция **заметания** (*sweeping*) формирует объемное тело трансляцией или вращением замкнутой плоской фигуры. В первом случае процесс формирования называется **заметанием при трансляции** (*translational sweeping*), во втором случае — **построением фигуры вращения** (*swinging, rotational sweeping*). Если плоская фигура будет незамкнутой, в результате заметания получится не объемное тело, а поверхность. Такой вариант заметания поддерживается системами поверхностного моделирования.

Заметание при трансляции и вращении представлено на рисунках 3.6 и 3.7 соответственно. Хотя рисунок 3.7 демонстрирует вращение на 360° , большинство систем твердотельного моделирования позволяют поворачивать фигуру на произвольный угол.

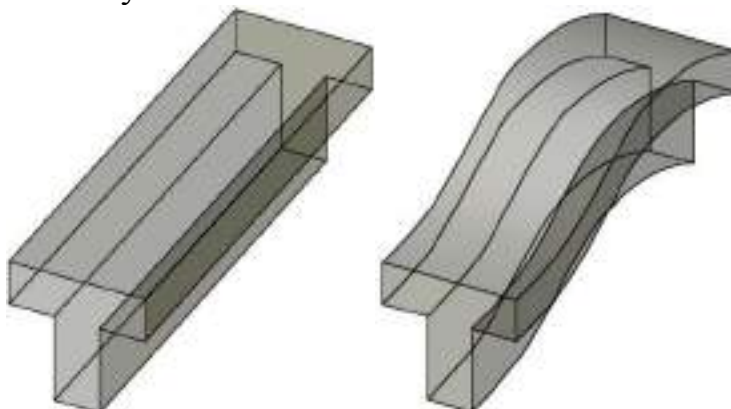


Рисунок 3.6 - Заметание при трансляции

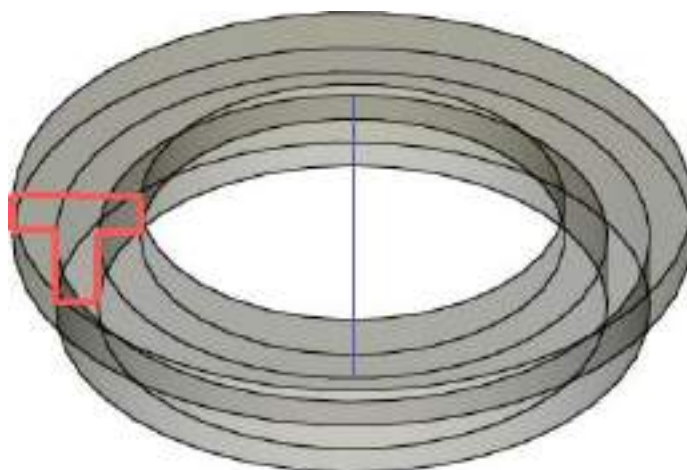


Рисунок 3.7 - Заметание при вращении

Скининг. Функция *скининга* (*skinning*) формирует замкнутый объем, натягивая поверхность на заданные плоские поперечные сечения тела (рисунок 3.8). Можно представить себе, что на каркас фигуры, образованный границами поперечных сечений, натягивается ткань или винил. Если к натянутой поверхности не добавить конечные грани (два крайних сечения), в результате получится поверхность, а не замкнутый объем. В таком варианте функция скининга представлена в системах поверхностного моделирования.

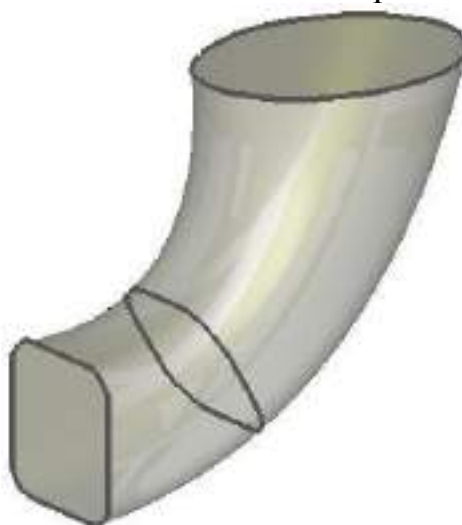
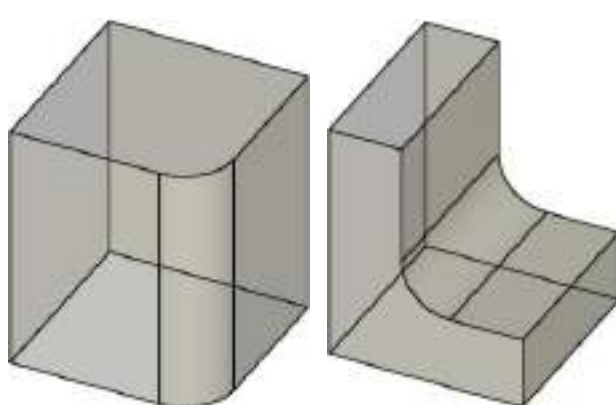


Рисунок 3.8 - Создание объемного тела методом скининга

III. Скругление или плавное сопряжение. Скругление (rounding), или плавное сопряжение (blending), используется для модифицирования существующей модели, состоящего в замене острого ребра или вершины гладкой криволинейной поверхностью, векторы нормали к которой непрерывно продолжают векторы нормали поверхностей, сходящихся у исходного ребра или вершины. Замену острого прямого ребра цилиндрической поверхностью демонстрирует рисунок 3.9а. Векторы нормали к цилиндрической поверхности продолжают векторами соседних плоских граней. Замена острой вершины сферической поверхностью показана на рисунке 3.10. Здесь также обеспечивается непрерывность векторов нормали. Частный случай скругления с добавлением, а не удалением



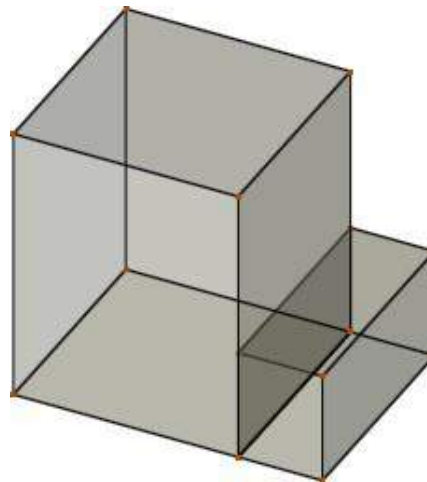
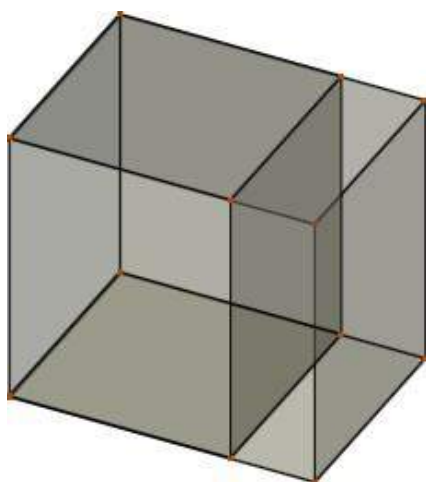
а

б

Рисунок 3.9 - Скругление ребер

Рисунок 3.10 - Скругление вершин

Поднятие. Поднятием/Вытягивание (*lifting*) называется перемещение всей грани объемного тела или ее части в заданном направлении с одновременным удлинением тела в этом направлении (рисунок 3.11а). Если нужно поднять только часть грани (рисунок 3.11б), эту грань необходимо



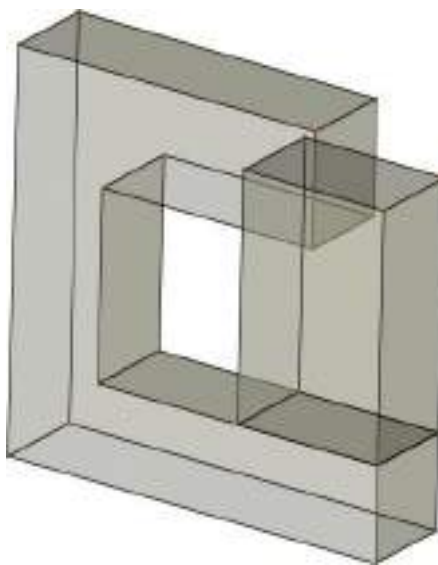
заранее разделить.

а

б

Рисунок 3.11 - Поднятие грани и ее части

Для этого достаточно добавить ребро, которое будет разбивать грань на нужные части. Но внутри системы при этом будут произведены некоторые дополнительные действия, результатом которых станет деление грани. Обычно при этом обновляются сведения о связности поверхности. Внутри системы подобные действия выполняются при помощи операторов Эйлера. Чтобы добавленная часть тела не пересекалась с исходной (рисунок 3.12) при работе с функцией поднятия необходимо правильно указывать направление и величину поднятия. Пересечение не вызовет проблем, если функция поднятия реализована так, что при пересечении выполняется объединение добавленной части с исходным телом. Однако изначально функция поднятия разрабатывалась для небольших местных изменений, поэтому ситуация,



показанная на рисунке 3.12, дает некорректное объемное тело.

Рисунок 3.12 - Самопересечение в результате поднятия

IV. Моделирование границ. Функции моделирования границ используются для добавления, удаления и изменения элементов объемного тела - его вершин, ребер и граней. Следовательно, процедура, использующая функции моделирования границ, будет выглядеть точно так же, как в системах поверхностного моделирования. Другими словами, вначале создаются точки, затем создаются ребра, соединяющие эти точки, и наконец, граничные ребра определяют поверхность. Однако в системах твердотельного моделирования, в отличие от систем поверхностного моделирования, нужно определить все поверхности таким образом, чтобы образовался замкнутый объем. Создание клина при помощи функций моделирования границ иллюстрирует рисунок 3.13. Процедура включает создание точек, ребер, граней и поверхностей.

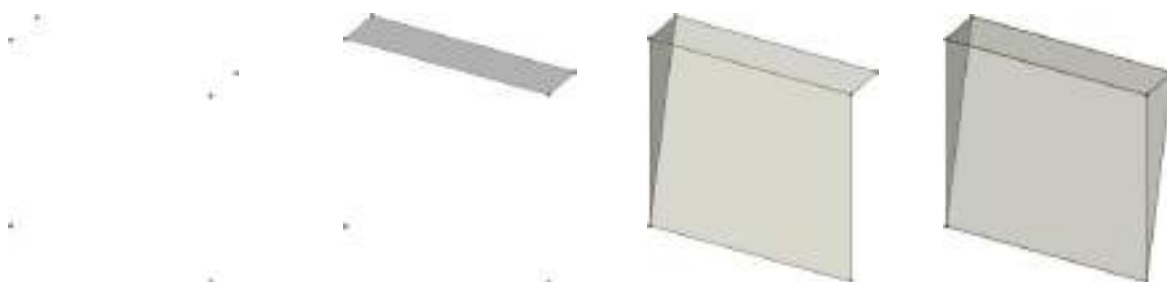
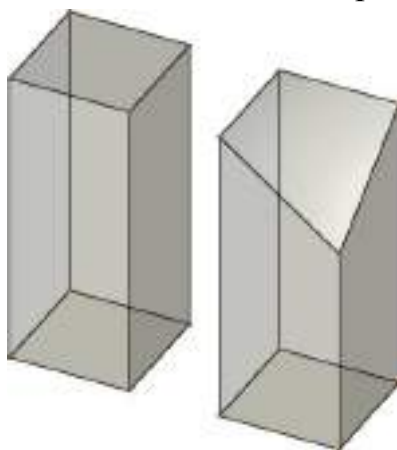


Рисунок 3.13 - Создание тела при помощи функций моделирования границ

Создавать объемное тело исключительно при помощи функций моделирования границ очень утомительно. Эти функции используются главным образом для создания плоских фигур, которые затем служат сечениями объемным телам, образуемым заметанием или скиннингом. Однако функции моделирования границ удобно применять для изменения формы уже существующего тела. Вершину можно передвинуть в новое положение, изменив соответствующим образом соседние ребра и грани (рисунок 3.14). Прямое ребро можно заменить криволинейным, в результате чего изменятся связанные грани и вершины (рисунок 3.15). Плоскую поверхность можно заменить на криволинейную с модификацией ребер и вершин (рисунок 3.16). Иногда плоскую поверхность можно заменять криволинейной, импортированной из системы поверхностного моделирования. Перечисленные функции моделирования называются *функциями тонкого редактирования (tweaking functions)*. Они используются для моделирования тел, ограниченных криволинейными поверхностями, поскольку такие



поверхности легко получать из плоских граней многогранника.

Рисунок 3.14 - Модификация объекта перемещением вершины

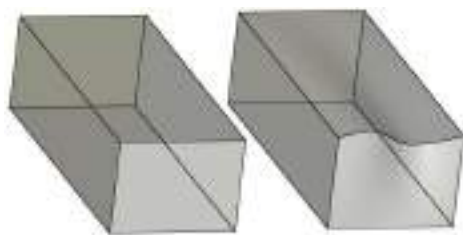


Рисунок 3.15 - Модификация объекта заменой ребра



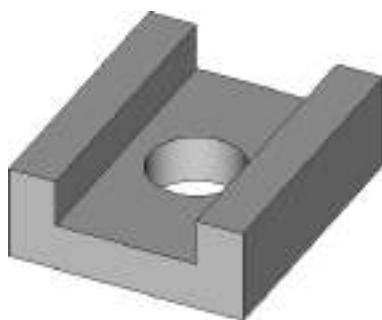
Рисунок 3.16 –

Модификация объекта заменой поверхности

V. Объектно-ориентированное моделирование.

Объектноориентированное моделирование (feature-based modeling) позволяет конструктору создавать объемные тела, используя привычные элементы форм [*features*). Созданное тело несет в себе информацию об этих элементах в дополнение к информации об обычных геометрических элементах (вершинах, ребрах, гранях и др.). Например, конструктор может давать команды типа «сделать отверстие такого-то размера в таком-то месте» или «сделать фаску такого-то размера в таком-то месте», и получившаяся фигура будет содержать сведения о наличии в конкретном месте отверстия (или фаски) конкретного размера. Набор доступных в конкретной программе элементов формы зависит от спектра применения этой программы.

Большинством систем объектно-ориентированного моделирования поддерживаются такие элементы, которые используются при изготовлении деталей: фаски, отверстия, скругления, пазы, выемки и т. д. Такие элементы называются *производственными*, поскольку каждый из них может быть получен в результате конкретного процесса производства. Например, отверстие создается сверлением, а выемка — фрезерованием. Следовательно, на основании сведений о наличии, размере и расположении производственных элементов можно попытаться автоматически сформировать план технологического процесса. Автоматическое планирование технологического процесса, если оно будет разработано на практическом уровне, перебросит мост между CAD и CAM, которые сейчас существуют отдельно друг от друга. Таким образом, в настоящий момент лучше моделировать объекты, подобные изображенному на рисунке 3.17, с использованием команд объектно-ориентированного моделирования «Паз» и «Отверстие», а не просто булевых операций. Модель, созданная при помощи таких команд, облегчит планирование технологического процесса, если не сделает его полностью автоматическим. Использование производственных элементов в моделиро-



вании иллюстрирует рисунок 3.18.

Рисунок 3.17 - Модель, созданная командами "Паз" и "Отверстие"

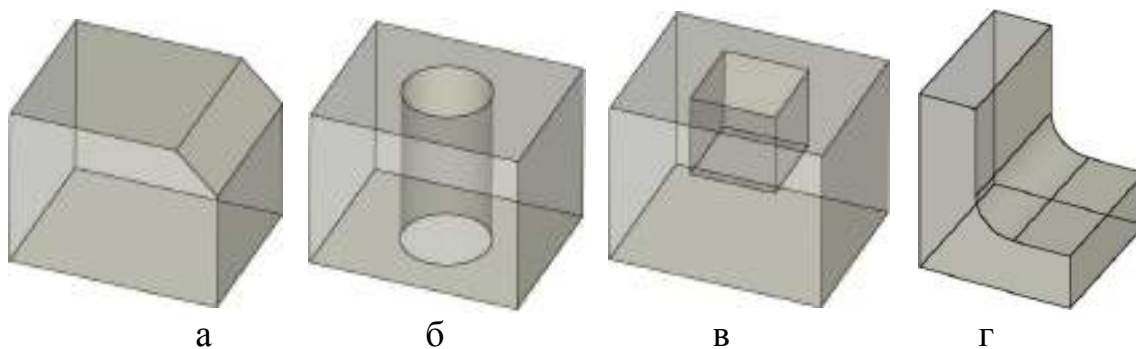


Рисунок 3.18 - Производственные элементы: а- фаска; б - отверстие; в – глухое отверстие; г - скругление

Один из недостатков объектно-ориентированного моделирования заключается в том, что система не может предоставить все элементы, нужные для всех возможных приложений. Для каждой задачи может потребоваться свой набор элементов. Чтобы исключить этот недостаток, большинство систем объектно-ориентированного моделирования поддерживают какой-либо язык, на котором пользователь при необходимости может определять свои собственные элементы. После определения элемента необходимо задать параметры, указывающие его размер. Элементы, как и примитивы, могут быть разного размера, а задаются размеры параметрами в момент создания элемента. Создание элементов разного размера путем присваивания различных значений соответствующим параметрам является разновидностью параметрического моделирования.

Моделирование кривых линий и поверхностей

Все не прямые и не ломаные линии называются кривыми. Кривые линии разделяются на два вида:

- плоские кривые, т.е. такие, все точки которых располагаются в одной плоскости;

- пространственные кривые (линии двойкой кривизны), т. е. такие, точки которых не принадлежат одной плоскости.

Если закон перемещения точки может быть выражен аналитически в виде уравнения, то образующая при этом линия называется закономерной, в противном случае - не закономерной, или графической. Закономерные кривые линии делятся на алгебраические, определяемые алгебраическими уравнениями (эллипс, парабола, гипербола и др.), и трансцендентные, определяемые трансцендентными уравнениями (синусоида, циклоида, спираль Архимеда и др.). Важной характеристикой алгебраической кривой является её порядок (трансцендентные кривые порядка не имеют). С алгебраической точки зрения порядок кривой линии равен степени её уравнения, с геометрической - наибольшему числу точек пересечения кривой с прямой линией для плоских кривых и с произвольной плоскостью для пространственных. В число точек пересечения включаются как действительные точки, так и совпавшие и мнимые. Например, прямую линию,

имеющую уравнение первой степени $ax+by+c=0$ (с произвольной прямой пересекается в одной точке), можно рассматривать как линию первого порядка, эллипс - кривая второго порядка, имеет уравнение $x^2/a^2+y^2/b^2=1$ второй степени, пересекается с прямой максимум в двух точках. Кривыми второго порядка являются также окружность, парабола, гипербола. Примерами кривых третьего порядка могут служить строфоида, Декартов лист, циссоида; четвертого - лемниската Бернулли, кардиоида, улитка Паскаля.

Прямая, пересекающая кривую линию в одной, двух и более точках, называется секущей (прямая **m**) (рисунок 3.19). Касательной прямой **t** в данной точке **A** линии **l** называется предел, к которому стремится секущая (AB), когда точка **B**, оставаясь на линии **l**, стремится к точке **A**. Касательная к прямой линии согласно этому определению есть сама прямая. Нормалью к кривой **l** называется прямая **n**, перпендикулярная к **l** и проходящая через точку касания **A**.

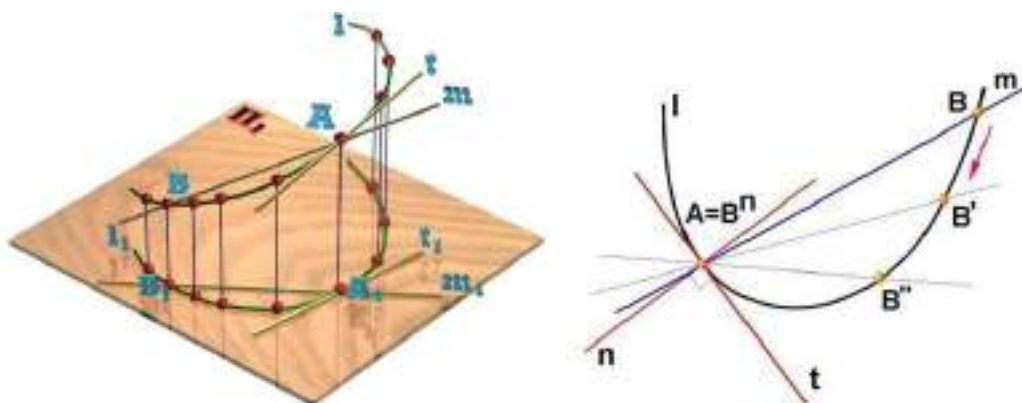


Рисунок 3.19 - Кривая линия

Кривая второго порядка имеет уравнение второй степени в декартовой системе координат. С прямой линией пересекается в двух точках (действительных, совпавших или мнимых).

Эллипс - геометрическое место точек, сумма расстояний которых до двух заданных точек (фокусов) - величина постоянная, равная $2|a|$ (длине большой оси эллипса). Эллипс не имеет несобственных точек.

Парабола - геометрическое место точек, равноудаленных от данной точки **F** (фокуса) и данной прямой **d** (директрисы). Парабола имеет одну несобственную точку.

Гипербола - геометрическое место точек, разность расстояний которых до двух заданных точек (фокусов) - величина постоянная, равная $2|a|$ (расстоянию между вершинами гиперболы). Гипербола имеет две несобственные точки, по одной на каждой асимптоте.

Кривые второго порядка - эллипс, окружность, парабола и гипербола - могут быть получены при пересечении конуса плоскостью и поэтому называются **коническими сечениями**.

Из закономерных пространственных кривых наибольшее практическое

применение находят винтовые линии, в частности, цилиндрическая винтовая линия (рисунок 3.20).

Цилиндрическая винтовая линия представляет собой пространственную кривую, описываемую точкой, совершающей равномерно-поступательное движение по образующей цилиндра вращения, которая в свою очередь вращается вокруг оси цилиндра с постоянной угловой скоростью. Величина P , на которую поднимается точка за один оборот образующей, называется шагом винтовой линии. Горизонтальная проекция винтовой линии является окружностью, а фронтальная - синусоидой. На развертке цилиндрической поверхности винтовая линия изобразится в виде прямой. Угол подъема винтовой линии равен углу наклона касательной t в любой точке винтовой линии к плоскости, перпендикулярной её оси.

Цилиндрическая винтовая линия, подобно прямой и окружности, обладает свойством сдвигаемости. Свойство сдвигаемости состоит в том, что каждый отрезок линии может сдвигаться вдоль неё, не подвергаясь деформации. Это свойство винтовой линии лежит в основе работы винтовых пар (винт-гайка). Винтовая линия является геодезической на цилиндрической поверхности. *Геодезической* называется линия, принадлежащая поверхности и кратчайшая из всех линий, которые можно провести между двумя точками поверхности. Кроме цилиндрической винтовой линии, геодезическими линиями также являются прямая на плоскости, окружность большого круга на сфере и др. Геодезическая линия изображается на развертке поверхности в виде прямой линии.

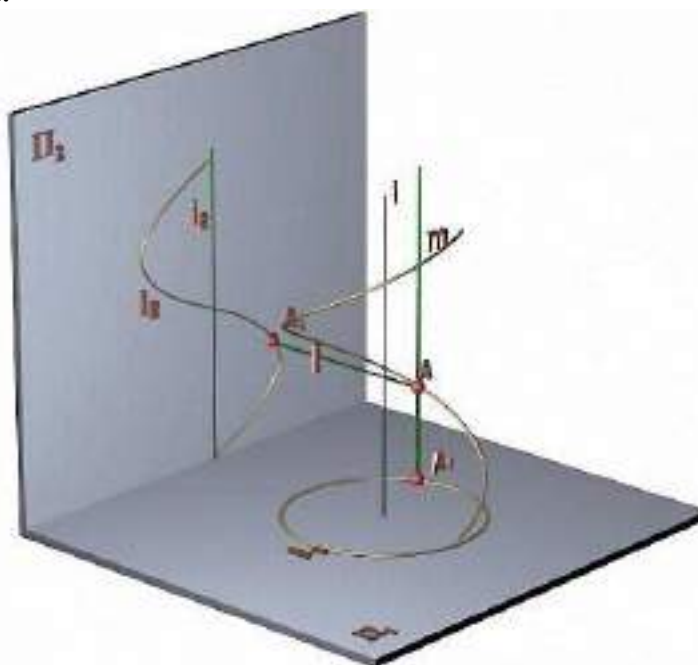


Рисунок 3.20 - Винтовая линия

В большинстве случаев с помощью тел и поверхностей, называемых аналитическими, нельзя описать реальные геометрические объекты. На протяжении долгого времени выход из этого положения заключался в

представлении объекта с помощью произвольно проведенных линий, взаимное сопряжение которых осуществлялось специалистами очень высокой квалификации: модельщиками, литейщиками, изготовителями штампов. Решение этой задачи в разных областях техники характеризовалось общим свойством - отсутствием какого бы то ни было предварительного математического определения, даже частичного, в результате чего решение задачи начиналось с выполнения последовательных шагов аппроксимации и заканчивалось вручную. Каждый шаг подгонки основывался на результатах экспериментов или просто на указаниях дизайнера. Из-за недостатка информации такие зависимости часто назывались экспериментальными.

В инженерной геометрии существует большое количество отработанных графических способов построения плавных кривых - обводов. Они традиционно применялись при проектировании таких объектов, как корпус корабля, кузов автомобиля, фюзеляж и крыло самолета и многих других (рисунок 3.21).

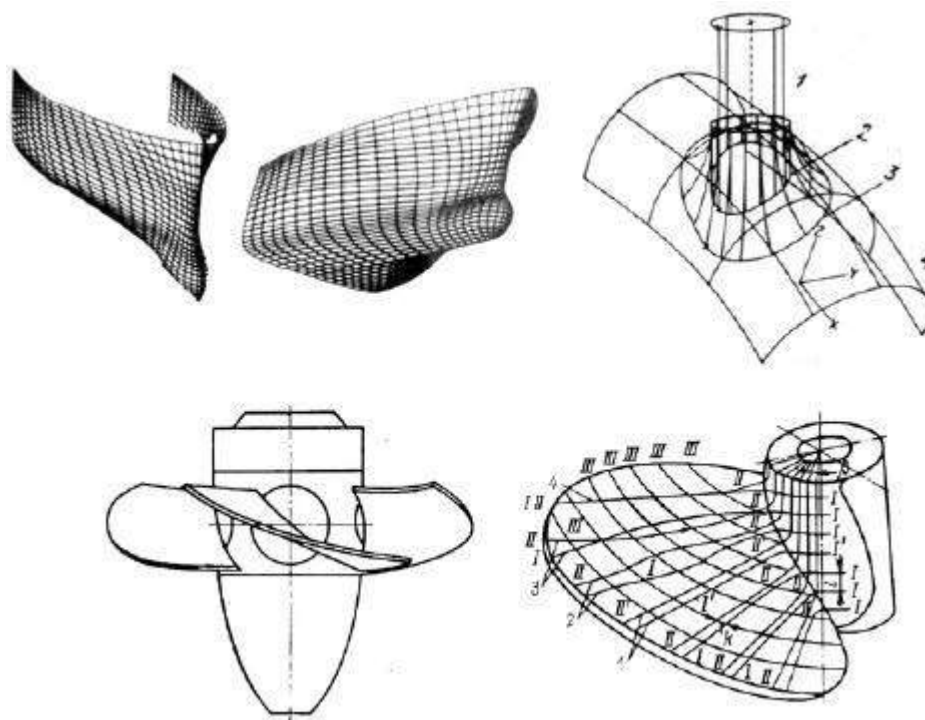


Рисунок 3.21 - Примеры кривых поверхностей в технике

В результате форма тела задается при помощи набора очень точно изготовленных сечений - плазов. Кроме перечисленных примеров сложную форму поверхности имеют лопасти гидравлических и паровых турбин, гребные винты, лопатки авиационных двигателей, крыльчатки и др., т. е. объекты, функциональные требования к которым связаны с омытием какой-либо средой. Кроме функциональных требований к изделиям предъявляются и эстетические. В этом случае также решаются задачи проектирования кривых линий и поверхностей произвольной формы.

Появление ЭВМ позволило перейти от «ручных» графических способов моделирования к более эффективному способу задания кривых и

поверхностей. Процесс проектирования происходит следующим образом: задают координаты сравнительно небольшого числа опорных точек (например, расчетных или полученных в результате эксперимента), лежащих на искомой линии или поверхности, и через эти точки проводят плавные кривые линии. Такое конструирование носит итерационный характер.

Модель (аналитическое описание), полученную на некотором шаге итерации, модифицируют и улучшают до тех пор, пока не будет достигнута желаемая форма кривой или поверхности. Проблема состоит в математически точном воспроизведении формы изделия, исходя из координат точек, расположенных на его поверхности.

При моделировании кривых линий и поверхностей, их машинного представления возникают задачи аппроксимации, интерполяции и сглаживания исходных данных (рисунок 3.22).

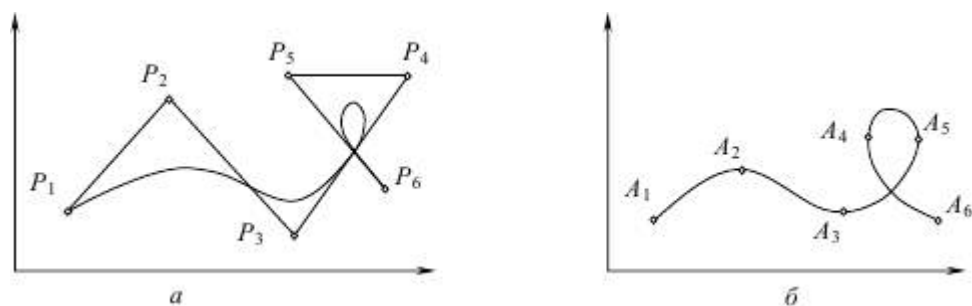


Рисунок 3.22 - Аппроксимация (а) и интерполяция (б) кривых

Задачи аппроксимации (приближенного представления) возникают при замене кривой или поверхности, описываемых сложными функциями, другими функциями, описываемыми более простыми уравнениями, без потери необходимой точности.

Задачи интерполяции (приближенного восстановления) связаны с поиском гладких кривых или поверхностей, проходящих через множество заданных точек.

Задачи сглаживания возникают, когда необходимо, чтобы искомая кривая или поверхность описывались функцией, обеспечивающей, например, необходимую степень дифференцирования.

Таким образом, при моделировании кривых линий и поверхностей решается следующая задача: по заданному массиву точек на плоскости или в пространстве строится кривая, проходящая через все эти точки (задача интерполяции) либо проходящая вблизи от этих точек (задача сглаживания).

Обратимся для определенности к задаче интерполяции и начнем рассмотрение с обсуждения правил выбора класса кривых.

Полином Лагранжа

Пусть на плоскости задан набор точек (x_i, y_i) , $i = 0, 1, \dots, n$, таких, что $x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n$ (рисунок 3.23).

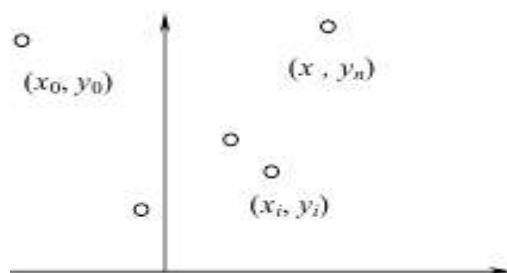


Рисунок 3.23 Набор точек

То обстоятельство, что точки заданного набора пронумерованы в порядке возрастания их абсцисс, позволяет искать кривую в классе графиков функций. Можно описать основные проблемы сглаживания этого дискретного набора, ограничившись случаем многочлена.

Из курса математического анализа известно, что существует интерполяционный многочлен Лагранжа

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i \frac{\omega_n(x)}{(x - x_i) \omega_n'(x_i)},$$

где $\omega_n(x) = \prod_{j=0}^n (x - x_j)$ график которого проходит через все заданные точки (x_i, y_i) , $i = 0, 1, \dots, n$.

Это обстоятельство и простота описания (заметим, что многочлен однозначно определяется набором своих коэффициентов; в данном случае их число совпадает с количеством точек в заданном наборе) являются несомненными преимуществами построенного интерполяционного многочлена.

Однако данный подход имеет и некоторые недостатки.

1. Степень многочлена Лагранжа на единицу меньше числа заданных точек. Поэтому чем больше точек задано, тем выше степень такого многочлена. И, хотя график интерполяционного многочлена Лагранжа всегда будет проходить через все точки массива, его уклонение (от ожидаемого) может оказаться довольно значительным (рисунок 3.24).

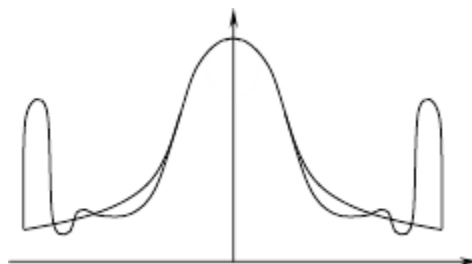


Рисунок 3.24 - Интерполяция полиномом Лагранжа

Кроме этого повышение степени многочлена приводит к нежелательным осцилляциям.

2. Изменение одной точки (ситуация, довольно часто встречающаяся на практике) требует полного пересчета коэффициентов интерполяционного многочлена и к тому же может существенно повлиять на вид задаваемой кривой.

Приближающую кривую можно построить и совсем просто: если последовательно соединить точки заданного набора прямолинейными отрезками, то в результате получится ломаная (рисунок 3.25).

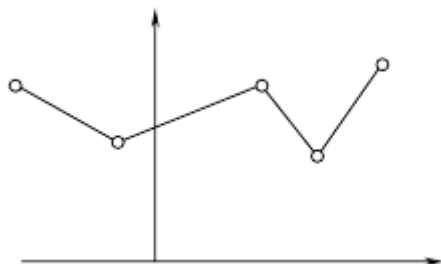


Рисунок 3.25 - Кусочно-линейная интерполяция

При такой кусочно-линейной интерполяции требуется найти всего $2n$ чисел (каждый прямолинейный отрезок определяется ровно двумя коэффициентами), но построенная таким образом аппроксимирующая кусочно-линейная функция не обладает нужной гладкостью: уже первая производная этой функции терпит разрывы в узлах интерполяции.

Рассмотрев эти две крайние ситуации, найдем класс функций, которые в основном сохранили бы перечисленные выше преимущества обоих подходов и одновременно были бы в известной степени свободны от их недостатков.

Для этого поступим так: будем использовать многочлены (как и в первом случае) и строить их последовательно, звено за звеном (как во втором случае). В результате получится, так называемый, полиномиальный многозвенник. При подобном подходе важно правильно выбрать степени привлекаемых многочленов, а для плавного изменения результирующей кривой необходимо еще тщательно подобрать коэффициенты многочленов (из условий гладкого сопряжения соседних звеньев). То, что получится в результате описанной схемы построения, называют сплайн-функциями или сплайнами.

Форма математического сплайна повторяет контур физического сплайна - гибкой металлической линейки, которыми издревле пользовались чертёжники и слесари-лекальщики (рисунок 3.26).

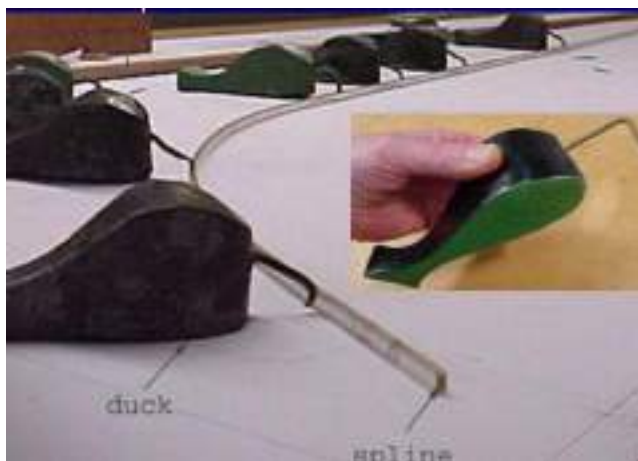
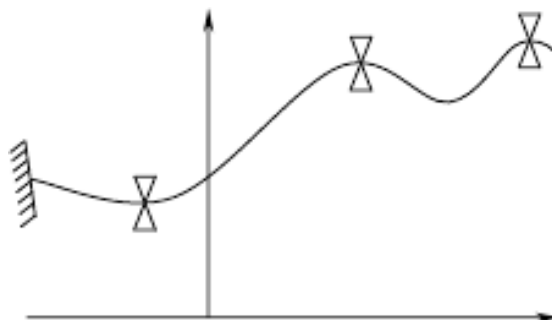


Рисунок 3.26 - Физический сплайн

Для изменения формы линейки используются точечные закрепления и концевые заделки. Меняя количество и расположение этих произвольно расположенных базовых точек, кривую можно выгнуть произвольным образом. Кривая всегда остаётся гладкой (не имеет разрывов и переломов)



(рисунок 3.27).

Рисунок 3.27 Сплайн

Задачи аппроксимации и интерполяции (интерполяция является частным случаем аппроксимации) при конструировании кривых линий и поверхностей могут быть решены с использованием различных вычислительных методов. При этом сегменты пространственных кривых аппроксимируются отрезками, дугами окружности, параболами и кривыми более высоких порядков.

Методы конструирования кривых линий и поверхностей: метод Эрмита, метод Безье, метод аппроксимации с помощью кубических В-сплайнов, метод Кунса и др. используют одинаковый подход: разбиение пространственной кривой на отдельные сегменты - элементарные куски. Описание этих сегментов полигонами третьей степени, определенные условия соединения элементарных кусков в составные кривые. Такие кривые в литературе обобщенно называют *сплайновыми кривыми*.

Сравнение форм Эрмита, Безье и В-сплайнов

Каждое из этих представлений оказывается полезным в разных ситуациях. Форма Эрмита пригодна для аппроксимации уже имеющихся поверхностей, когда необходимо добиться как соответствия точек, так и соответствия касательных векторов, в то время как представление в виде В-

сплайнов удобно для аппроксимации точек.

Формы Безье и В-сплайнов пригодны для работы в интерактивном режиме, так как их геометрические векторы состоят из одних только точек. Обе эти формы обладают свойством выпуклой оболочки, которое оказывается полезным при изображении кривых. Отметим, что кривую, первоначально заданную в одной форме, можно преобразовать в другую форму.

На рисунке 3.28 и рисунке 3.29 показано различие в поведении кривых, построенных разными методами на основе одного и того же точечного базиса.

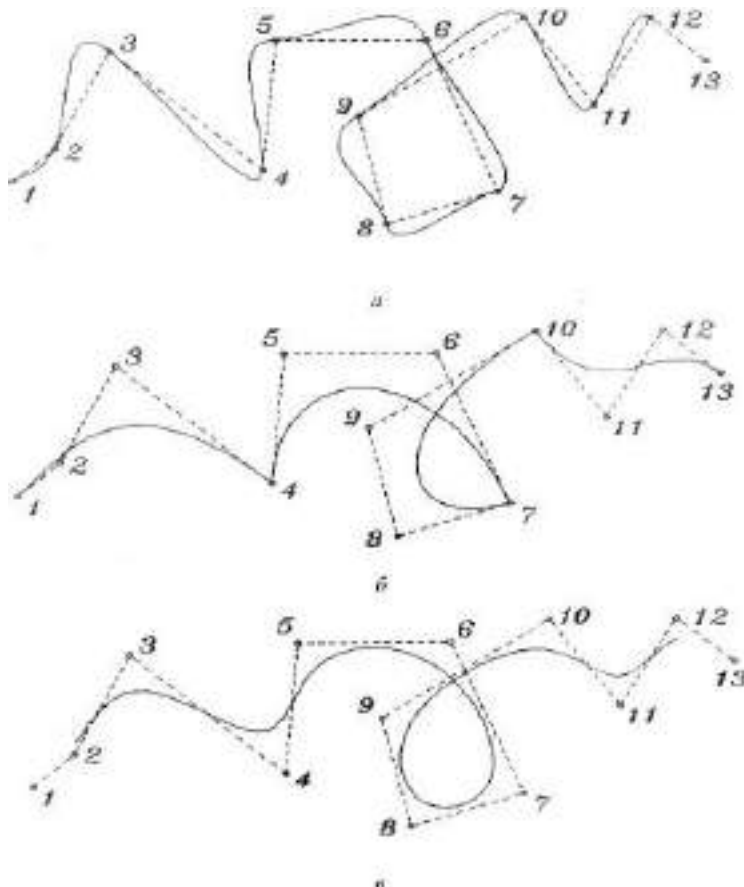


Рисунок 3.28 - Три формы построения кривых: а – форма Эрмита; б – форма Безье; в – форма В-сплайна

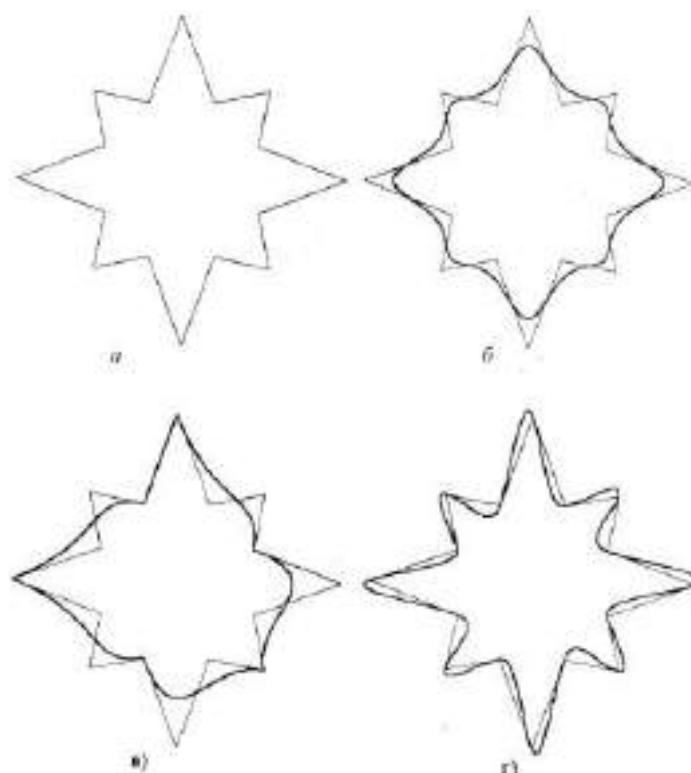


Рисунок 3.29 - Сглаживание фигуры: а – исходная фигура; б – форма В-сплайна; в – форма Безье; г – форма Эрмита

Одними из самых популярных сплайнов, применяемых в компьютерном моделировании, являются "кривые Безье" и NURBS-кривые (Non-Uniform Rational B-Spline - неоднородный рациональный фундаментальный сплайн). Эти сплайны обладают высокой степенью гладкости, легко вычисляются и управляются.

Кривая (сплайн) Безье задаётся вершинами многоугольника и в общем случае не проходит через базовые точки (рисунок 3.30).

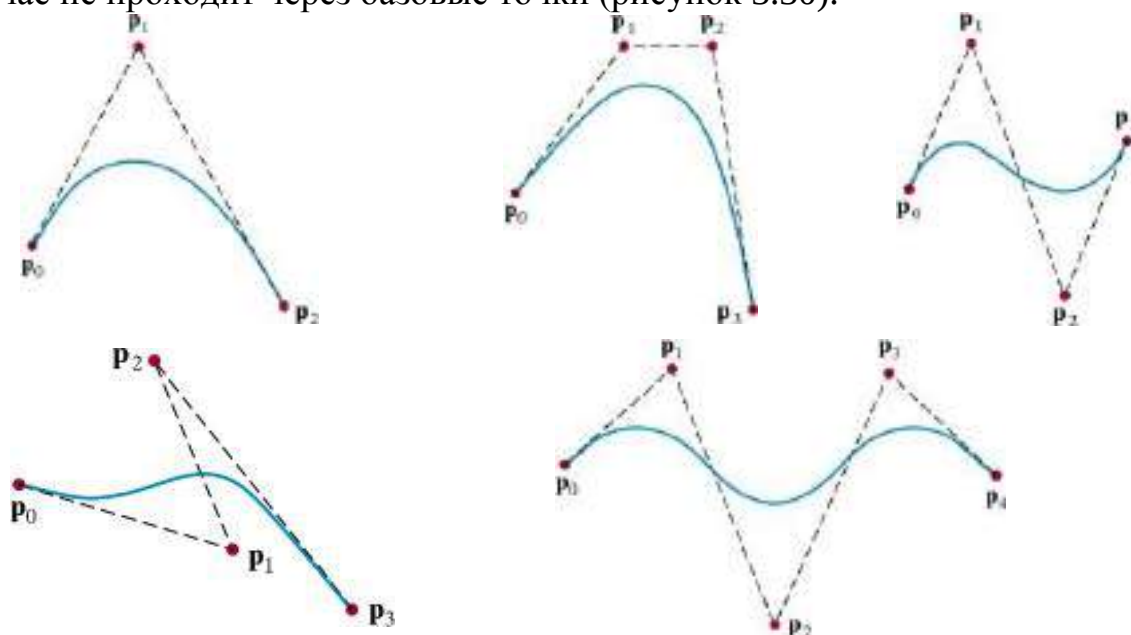


Рисунок 3.30 - Сплайны Безье

Для получения кривой, проходящей через заданные точки применяются составные кривые Безье, которые также можно использовать для задач интерполяции.

Неоднородный рациональный В-сплайн или NURBS подобен обычному кубическому В-сплайну.

NURBS-кривые не проходят через базовые точки, а усредняют - аппроксимируют их, причём узловые точки могут быть расставлены неравномерно. Такие линии называются неоднородными, а каждый такой узел, имеющий свой вес (коэффициент, определяющий влияние данной точки на кривизну линии), - рациональным. Перемещая узловые точки, можно управлять формой кривой (рисунок 3.31).

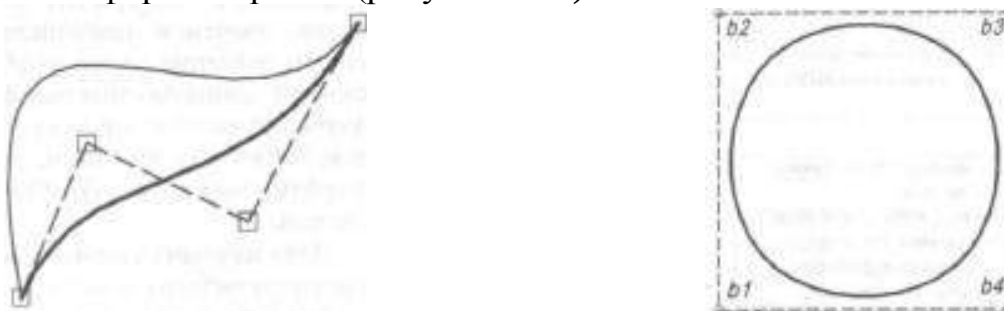


Рисунок 3.31 - Интерактивное управление формой гладких NURBS-кривых

NURBS позволяет точно воспроизвести все конические сечения - окружность (см. рисунок 3.31 справа), эллипс, параболу и гиперболу. В NURBS - представлении можно работать не только с коническими сечениями, но с кривыми Безье, рациональными кривыми Безье и В-сплайнами. Преобразование всех этих кривых к NURBS может значительно сократить объем программирования.

Поверхности Безье используются при интерактивном проектировании по тем же причинам, что и кривые Безье: управляющие точки позволяют легко изменять форму куска поверхности. Поверхности Безье так же, как и кривые Безье, обладают свойством выпуклой оболочки. Геометрическая матрица состоит из 16 управляющих точек (рисунок 3.32).

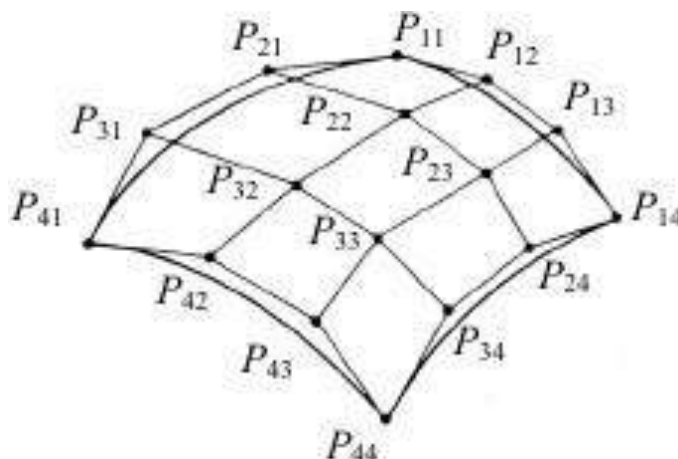


Рисунок 3.32 - Шестнадцать управляющих точек бикубического куска Безье

Для достижения непрерывности в поперечном направлении относительно

ребер кусков необходимо равенство четырех управляющих точек, принадлежащих общим ребрам соседних кусков. Для непрерывности касательного вектора требуется, чтобы две четверки управляющих точек по обеим сторонам общего ребра были коллинеарны другим ребрам. Коллинеарными будут следующие совокупности управляющих точек: (P13, P14, P15), (P23, P24, P25), (P33, P34, P35), (P43, P44, P45). Отношения длин коллинеарных отрезков должны быть постоянными (рисунок 3.33).

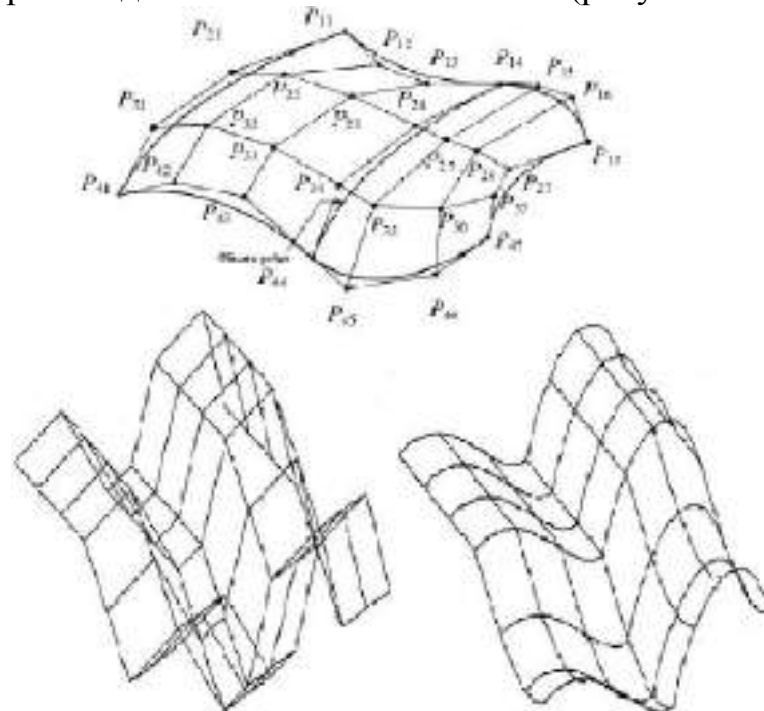
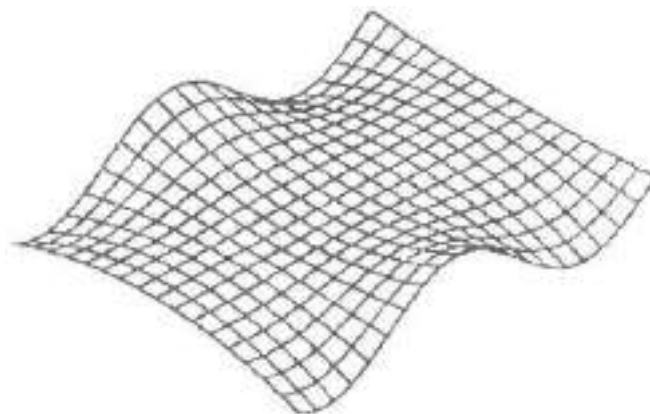


Рисунок 3.33 - Составные поверхности Безье

На рисунках 3.34 и 3.35 приведены примеры В-сплайновых поверхностей.

Рисунок 3.34 - Пример В-сплайновой поверхности



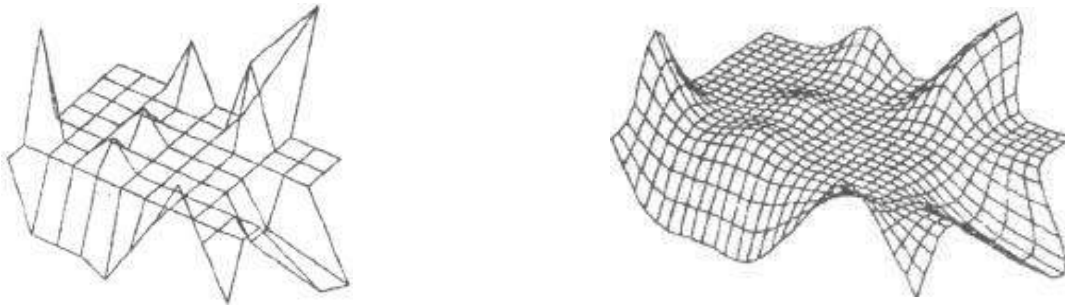
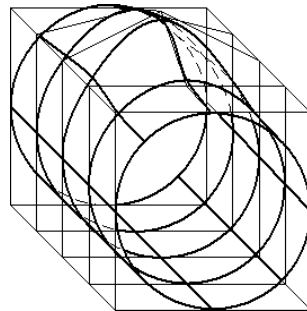


Рисунок 3.35 - Каркас и В-сплайновая поверхность

На рисунке 3.36 показана NURBS-поверхность третьего порядка по каждому из двух направлений. Характеристический многогранник изображен



тонкими линиями.

Рисунок 3.36 - NURBS-поверхность

Лекция 15. Классификация поверхностей. Развёртки

Поверхность представляет собой множество последовательных положений линии, перемещающейся в пространстве. Эту линию называют образующей поверхности. Она может быть прямой или кривой. Закон перемещения образующей задается линиями - направляющими.

Многогранники

Поверхность, образованная частями попарно пересекающихся плоскостей, называется многогранной. Элементами многогранных поверхностей являются грани, ребра и вершины. Отсеки плоскостей, образующие многогранную поверхность, называются гранями, линии пересечения смежных граней - ребрами, точки пересечения не менее чем трех граней - вершинами (рисунок 4.1).

Если каждое ребро многогранной поверхности принадлежит одновременно двум её граням, то её называют замкнутой (рисунок 4.1б, г), в противном случае - незамкнутой (рисунок 4.1а, в). Многогранная поверхность называется пирамидальной, если все её ребра пересекаются в

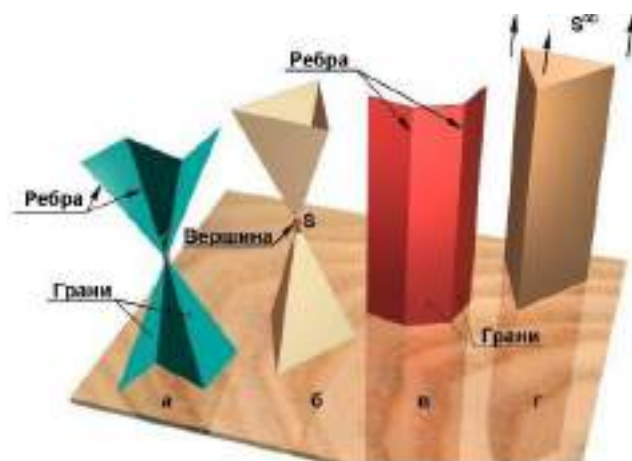


Рисунок 4.1 - Элементы многогранных поверхностей

одной точке - вершине (см. рисунок 4.1а). Пирамидальная поверхность имеет две неограниченные полы. Многогранная поверхность называется призматической, если все её ребра параллельны между собой (см. рисунок 4.1г).

Геометрическое тело, со всех сторон ограниченное плоскими многоугольниками, называется многогранником (рисунок 4.2). Простейшими многогранниками являются пирамиды и призмы.

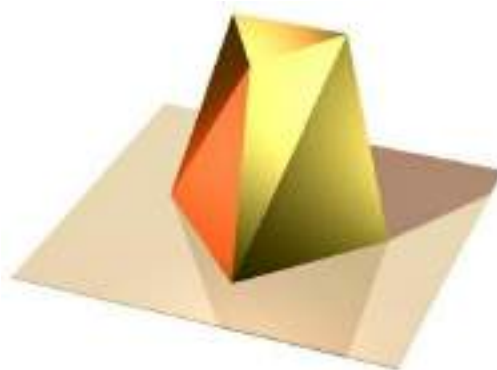


Рисунок 4.2 - Многогранник

Среди других видов многогранников следует выделить - призматойды и правильные многогранники (тела Платона). Призматойдом называется многогранник, у которого верхнее и нижнее основания - многоугольники, расположенные в параллельных плоскостях, а боковые грани представляют собой треугольники или трапеции.

Существует пять правильных многогранников:

-**тетраэдр** (четырёхгранник) - ограничен четырьмя равносторонними и равными треугольниками;

-**гексаэдр** (шестигранник, или куб) - ограничен шестью равными

квадратами;

-октаэдр (восьмигранник) - ограничен восемью равносторонними и равными треугольниками;

-додекаэдр (двенадцатигранник) - ограничен двенадцатью равносторонними и равными пятиугольниками;

-икосаэдр (двадцатигранник) - ограничен двадцатью равносторонними и равными треугольниками.

Вокруг всех правильных многогранников можно описать сферу. Совокупность всех ребер и вершин многогранника называется его сеткой.

Кривые поверхности (рисунок 4.3) широко применяются в различных областях науки и техники при создании очертаний различных технических форм или как объекты инженерных исследований.



Рисунок 4.3 - Пример сложной поверхности

Существуют три способа задания кривых поверхностей:

- -аналитический - при помощи уравнений;
- -при помощи каркаса;
- -кинематический - перемещением линий в пространстве.

Составлением уравнений поверхностей занимается аналитическая геометрия; она рассматривает кривую поверхность как множество точек, координаты которых удовлетворяют некоторому уравнению или системе алгебраических уравнений.

При каркасном способе задания кривая поверхность задается

совокупностью некоторого количества линий, принадлежащих поверхности. В качестве линий, образующих каркас, как правило, берут семейство линий, получающихся при пересечении поверхности рядом параллельных плоскостей. Этот способ применяется при проектировании кузовов автомобилей, в самолето- и судостроении, в топографии и т.п.

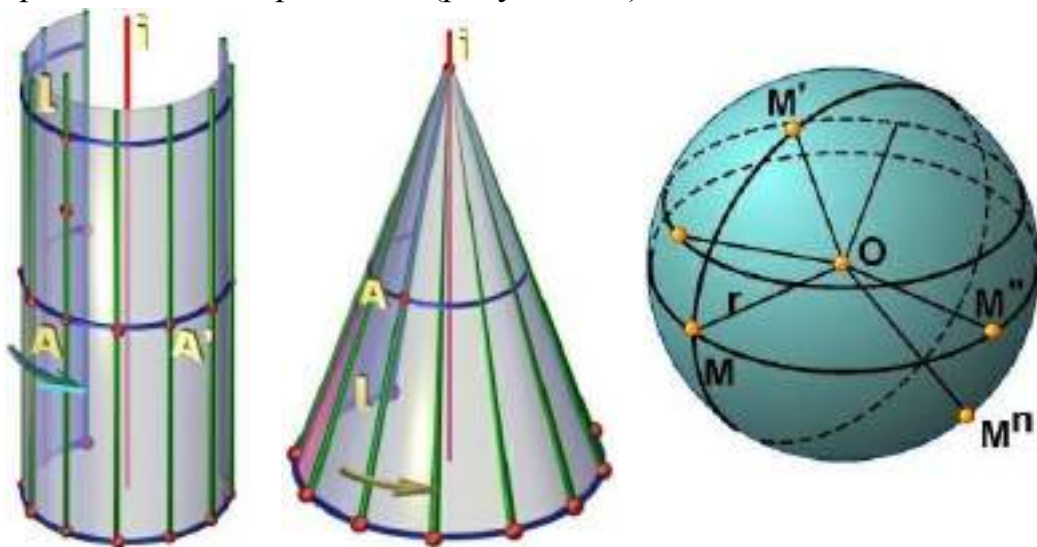
При кинематическом способе образования и задания кривых поверхностей каждая кривая поверхность рассматривается как совокупность последовательных положений образующей линии, перемещающейся в пространстве по определенному закону. Образующая линия при своем движении может оставаться неизменной, а может и менять свою форму. Закон перемещения образующей линии, как правило, задается при помощи направляющих линий и алгоритма перемещения образующей по направляющим.

Определителем поверхности называют совокупность условий, необходимых и достаточных для задания поверхности в пространстве. Определитель поверхности выявляется путем анализа способов образования поверхности или её основных свойств. В общем случае поверхность может быть образована несколькими способами и поэтому может иметь несколько определителей. Обычно из всех способов образования поверхности выбирают простейший. Определитель поверхности состоит из двух частей:

-*геометрической части* - совокупности геометрических фигур, с помощью которых можно образовать поверхность;

-*алгоритмической части* - алгоритма формирования поверхности при помощи фигур, входящих в геометрическую часть определителя.

Рассмотрим примеры выявления определителя для некоторых простейших поверхностей (рисунок 4.4):



1. **Цилиндрическая поверхность вращения** может быть образована вращением прямой $l \parallel i$ вокруг оси i . Геометрическая часть определителя поверхности состоит из образующей l и оси i .

1. Алгоритмическая часть определителя состоит из операции вращения образующей линии l вокруг оси i .

2. **Коническая поверхность вращения** может быть образована вращением прямой l , пересекающей ось вращения i под некоторым углом. Алгоритмическая часть определителя состоит из словесного указания о том, что поверхность образуется вращением образующей l вокруг оси i .

3. **Сферой** называется поверхность, образованная множеством точек пространства, находящихся на расстоянии $|r|$ от данной точки O . Геометрическая часть определителя сферы состоит из точки O (центра сферы) и точки M , принадлежащей её поверхности. Алгоритм построения любой точки сферы заключается в проведении через точку O произвольной прямой и откладывания на ней от точки O отрезка $|OM'| = |OM| = r$.

Кривые поверхности разделяются на линейчатые и нелinearчатые, закономерные и не закономерные. Поверхность называется линейчатой, если она может быть образована перемещением прямой линии, в противном случае она называется нелinearчатой. Если поверхность может быть задана каким-либо уравнением, она называется закономерной, в противном случае - не закономерной, или графической (задается только чертежом). Закономерные поверхности, в зависимости от вида уравнения, разделяются на алгебраические и трансцендентные. Алгебраическое уравнение n -й степени (в декартовых координатах) задает алгебраическую поверхность n -го порядка (трансцендентные поверхности порядка не имеют). Алгебраическая поверхность n -го порядка пересекается плоскостью по кривой n -го порядка, а с прямой линией - в n точках. Плоскость, имеющую уравнение первой степени (с произвольной плоскостью пересекается по прямой линии, а с прямой - в одной точке), можно рассматривать как поверхность первого порядка.

Примерами кривых поверхностей второго порядка могут служить поверхности, образованные вращением кривых второго порядка вокруг одной из своих осей. Поверхности второго порядка пересекаются с произвольной плоскостью по кривым второго порядка, а с прямой - в двух точках. Примером поверхности четвертого порядка может служить тор.

Наибольшее применение в технике получили кинематические кривые поверхности с образующими постоянной формы:

- линейчатые поверхности: развертывающиеся, неразвертывающиеся, винтовые.
- поверхности вращения.

Поверхность называется линейчатой, если она может быть образована перемещением прямой линии. Поверхность, которая не может быть образована движением прямой линии, называется нелинейчатой. Например, конус вращения - линейчатая поверхность, а сфера - нелинейчатая. Через любую точку линейчатой поверхности можно провести, по крайней мере, одну прямую, целиком принадлежащую поверхности. Множество таких прямых представляет собой непрерывный каркас линейчатой поверхности. Все нелинейчатые поверхности являются неразвертывающимися.

Поверхность называется развертывающейся, если она путем изгибания может быть совмещена с плоскостью без образования складок и разрывов. Очевидно, что все многогранные поверхности являются развертывающимися. Из кривых поверхностей этим свойством обладают только те линейчатые поверхности, которые имеют ребро возврата.

Существует только три вида линейчатых поверхностей, имеющих ребро возврата: торсы, конические и цилиндрические (рисунок 4.5).

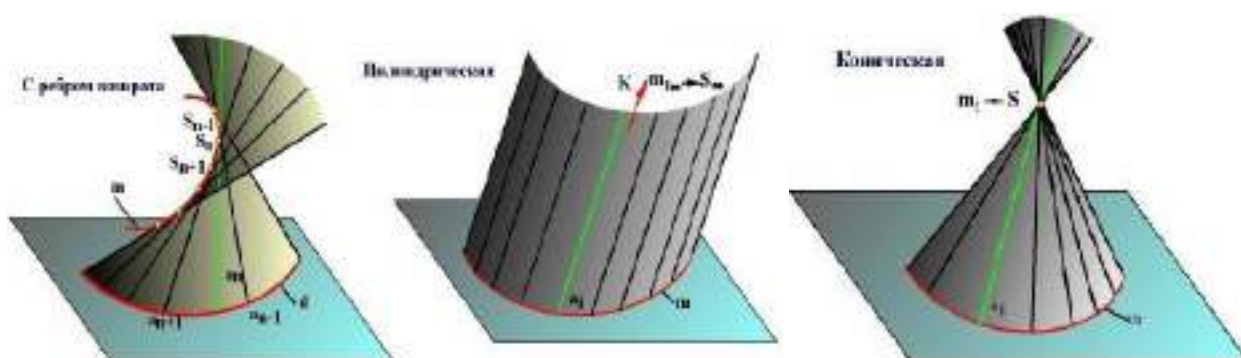


Рисунок 4.5 - Линейчатые поверхности с ребром возврата

Торсы

Возьмем некоторую пространственную ломаную линию 1, 2, 3, 4, 5, 6, ... и продолжим её стороны так, как показано на рисунке 4.6. В результате получим двухполую многогранную развертываемую поверхность. При неограниченном увеличении числа сторон ломаной линии с одновременным стремлением длины каждой из них к нулю и переходе к

пределу получим:

- пространственная ломаная линия 1, 2, 3, 4, 5, 6, ... преобразуется в пространственную кривую линию m ;
- ребра многогранной поверхности преобразуются в касательные к пространственной кривой m ;
- многогранная поверхность преобразуется в линейчатую двухполую развертывающуюся кривую поверхность, которая называется торсом.

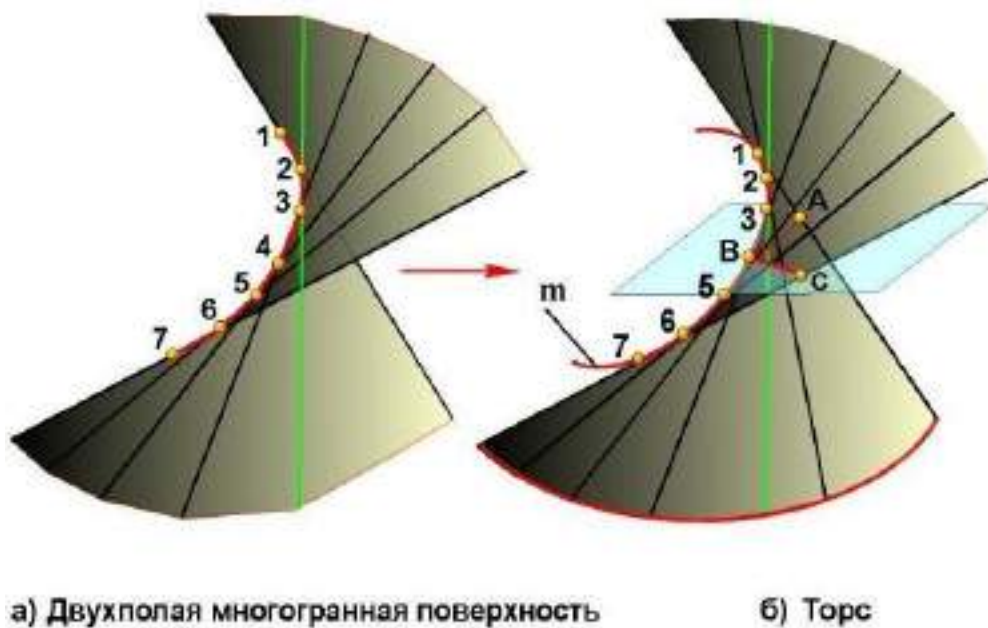


Рисунок 4.6 - Формирование торса

Множество всех касательных прямых к пространственной кривой представляет собой непрерывный каркас поверхности торса. Через каждую точку поверхности проходит одна касательная к кривой m . Таким образом, торс представляет собой поверхность, которая образуется непрерывным движением прямолинейной образующей, касающейся во всех своих положениях некоторой пространственной кривой линии. Направляющая пространственная кривая m служит границей между двумя полостями поверхности торса и называется ребром возврата. Если взять на кривой m какую-либо точку B и провести через неё плоскость, пересекающую обе полости поверхности, то полученная в пересечении кривая ABC будет иметь так называемую точку возврата B , следовательно, ребро возврата является множеством точек возврата кривых линий, полученных при пересечении данной поверхности различными плоскостями. Этим и объясняется её название. Если ребром возврата является цилиндрическая винтовая линия, то такая поверхность называется развертывающимся

геликоидом.

Свойством развёртываемости торс обладает потому, что он является пределом некоторой развертывающейся многогранной поверхности. Геометрическая часть определителя торса состоит из ребра возврата. Алгоритмическая часть определителя торса состоит из указания о том, что образующая прямая при своём движении остается касательной к ребру возврата. Если ребро возврата выродится в собственную точку пространства, то образующие торса, проходя через неё, образуют коническую поверхность произвольного вида. Если эта точка (вырожденное ребро возврата) будет несобственной точкой пространства, то образующие торса, проходя через неё, окажутся параллельными между собой и образуют цилиндрическую поверхность общего вида. Таким образом, цилиндрическая и коническая поверхности обладают свойством развёртываемости, так как являются частными случаями поверхности торса. Однако, чтобы задать коническую или цилиндрическую поверхности, недостаточно иметь только ребро возврата (собственную или несобственную точку) - положение образующей прямой не определяется одной точкой. Необходимо задать ещё направляющую линию.

Цилиндрическая поверхность образуется движением прямой линии, скользящей по некоторой неподвижной замкнутой или незамкнутой кривой и остающейся параллельной

своему исходному положению (рисунок 4.7).

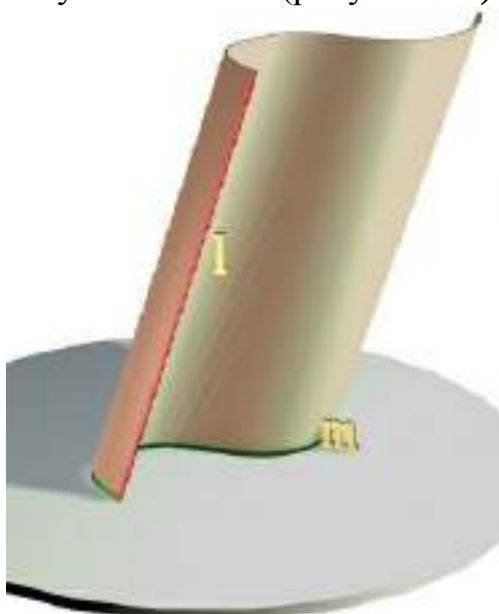


Рисунок 4.7 - Формирование цилиндрической поверхности

Множество прямолинейных образующих представляет собой непрерывный каркас цилиндрической поверхности. Через каждую точку поверхности проходит одна прямолинейная образующая (см. рисунок 4.5). Неподвижная кривая m , по которой скользит образующая l , называется направляющей. Если направляющая линия является кривой второго порядка, то и цилиндрическая поверхность будет второго порядка. Геометрическая часть определителя цилиндрической поверхности состоит из направляющей линии m и исходного положения образующей l . Алгоритмическая часть определителя состоит из указания о том, что любая образующая поверхности может быть построена как прямая, пересекающая кривую m и параллельная прямой l . Цилиндрическая поверхность является бесконечной в направлении своих образующих. Часть замкнутой цилиндрической поверхности, заключенная между двумя плоскими параллельными сечениями, называется цилиндром, а фигуры сечения

- его основаниями. Сечение цилиндрической поверхности плоскостью, перпендикулярной её образующим, называется нормальным. В зависимости от формы нормального сечения цилиндры бывают (рисунок 4.8):

- круговые - нормальное сечение - окружность;
- эллиптические - нормальное сечение - эллипс;
- параболические - нормальное сечение - парабола;
- гиперболические - нормальное сечение - гипербола;
- общего вида - нормальное сечение - кривая случайного вида.

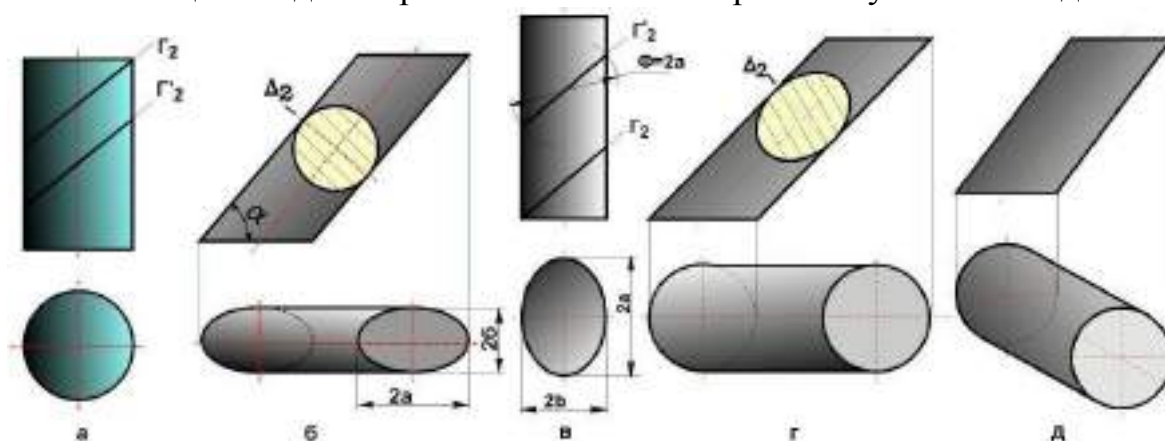


Рисунок 4.8 - Разновидности цилиндра

Если за основание цилиндра принимается его нормальное сечение (окружность), цилиндр называют прямым (рисунок 4.8а). Если за основание цилиндра принимается одно из косых сечений, цилиндр

называют наклонным (рисунок 4.8б, г, д). Наклонные сечения прямого кругового цилиндра являются эллипсами (см. рисунок 4.8а). Наклонные сечения прямого эллиптического цилиндра в общем случае - эллипсы (см. рисунок 4.8б). Однако его всегда можно пересечь плоскостью, наклонной к его образующим, таким образом, что в сечении получится окружность.

Коническая поверхность образуется движением прямой линии, скользящей по некоторой неподвижной замкнутой или незамкнутой кривой и проходящей во всех своих положениях через неподвижную точку (рисунок 4.9).



Рисунок 4.9 - Формирование конической поверхности

Неподвижная кривая m , по которой скользит образующая l , называется направляющей (см. рисунок 4.5). Если направляющая линия является кривой второго порядка, то и коническая поверхность будет второго порядка. Неподвижная точка S , делящая поверхность на две бесконечные половины, называется вершиной. Множество прямолинейных образующих представляет собой непрерывный каркас конической поверхности. Через каждую точку поверхности проходит одна прямолинейная образующая (исключением является только вершина S , которая называется "особой точкой поверхности"). Геометрическая часть определителя конической поверхности состоит из направляющей кривой m и вершины S . Алгоритмическая часть определителя состоит из указания

о том, что любая образующая поверхности может быть построена как прямая, проходящая через вершину S и пересекающая кривую m . Часть замкнутой конической поверхности, ограниченная вершиной и какой-либо плоскостью, пересекающей все её образующие, называется конусом. Фигура сечения конической поверхности этой плоскостью называется основанием конуса. Сечение конической поверхности плоскостью, перпендикулярной её оси, называется нормальным. Осью конической поверхности называется линия пересечения её плоскостей симметрии. Следовательно, не все конические поверхности имеют ось, а только те, которые имеют не меньше двух плоскостей симметрии. Конические поверхности, не имеющие оси (а, следовательно, и нормального сечения), называются коническими поверхностями общего вида.

Конические поверхности, имеющие ось, в зависимости от вида нормального сечения бывают (рисунок 4.10):

- круговые - нормальное сечение - окружность;
- эллиптические - нормальное сечение - эллипс;
- другие.

Если за основание конуса принимается фигура его нормального сечения, конус называют прямым, если иное сечение - наклонным. Прямой круговой конус изображен на рисунке 4.10а, наклонный круговой конус - на рисунке 4.10б. Основанием такого конуса может быть только эллипс, ось его не проходит через центр основания. Прямой эллиптический конус показан на рисунке 4.10в. Эллиптический конус (так же как и эллиптический цилиндр) имеет две системы круговых сечений. Если принять одну из них за основание конуса, получим наклонный эллиптический конус с круговым основанием (рисунок 4.10г). Ось наклонного конуса не проходит через центр основания.

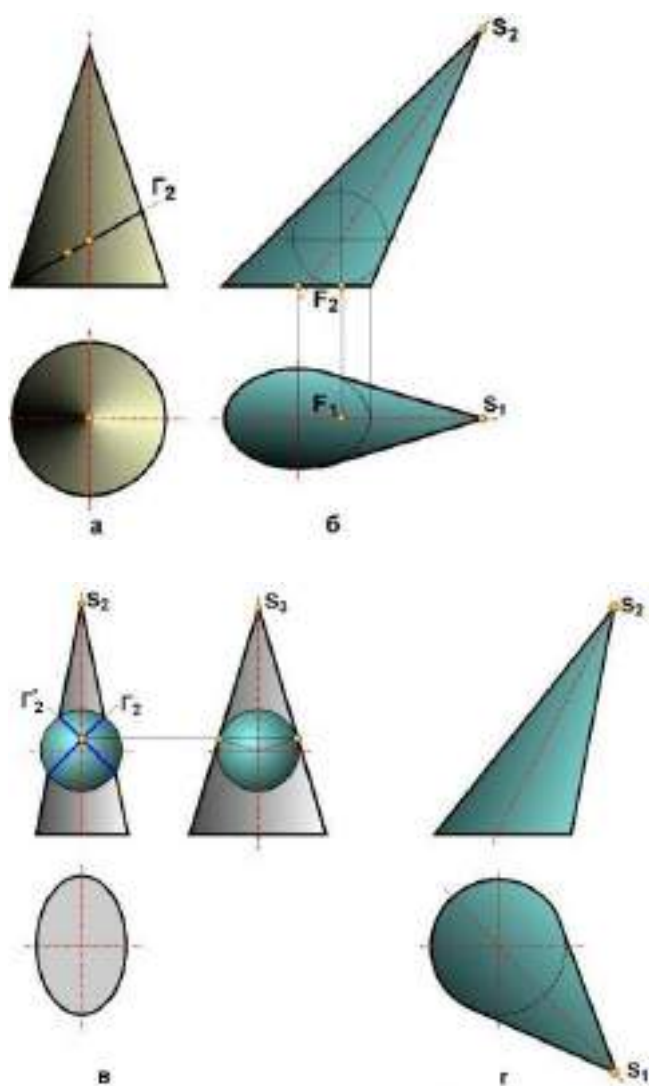


Рисунок 4.10 - Разновидности конуса

Заметим, что у всех развертывающихся линейчатых поверхностей две смежные образующие либо пересекаются (торс, коническая поверхность), либо параллельны (цилиндрическая поверхность).

Неразвёртывающиеся (косые) линейчатые поверхности в общем случае образуются движением прямолинейной образующей по трем направляющим линиям, которые однозначно задают закон её перемещения (рисунок 4.11). Множество возможных положений прямой, которая в каждый момент времени пересекает три скрещивающиеся прямые образует однополостный гиперболоид.

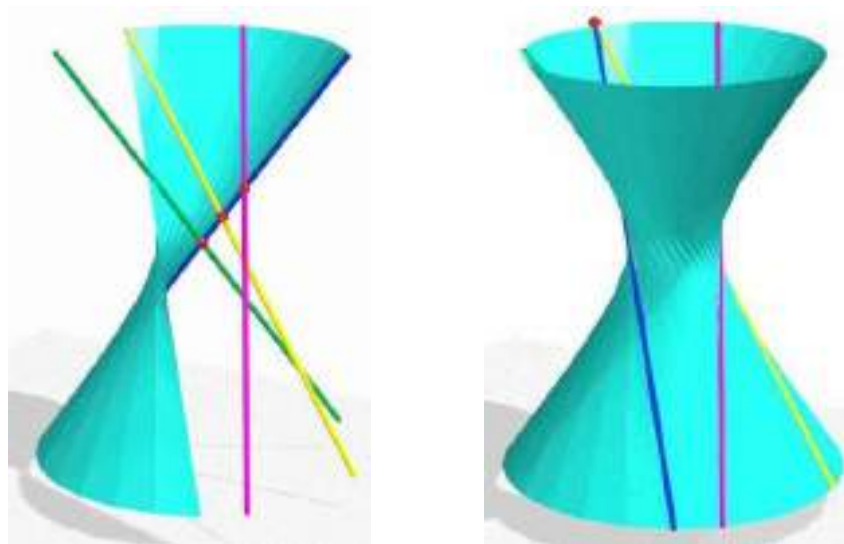


Рисунок 4.11 - Однополостный гиперболоид

Направляющие линии могут быть прямыми и кривыми. В общем случае линейчатая поверхность может быть построена из множества образующих прямых, пересекающих три заданные пространственные кривые (рисунок 4.12).

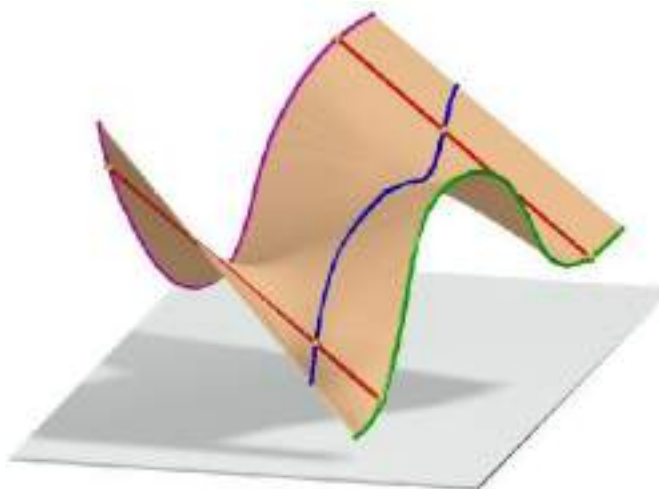


Рисунок 4.12 - Формирование кривой поверхности

Разновидностями косых поверхностей являются линейчатые поверхности с направляющей плоскостью и частные их виды - линейчатые поверхности с плоскостью параллелизма (поверхности Каталана). В первом случае поверхность однозначно задается двумя направляющими линиями и направляющей плоскостью, которая заменяет третью направляющую линию. Образующая прямая скользит по двум направляющим и сохраняет постоянный угол с некоторой плоскостью ,

которая называется направляющей. В частном случае, если угол равен нулю, образующая прямая будет параллельна направляющей плоскости, которая в этом случае называется плоскостью параллелизма.

Поверхности с направляющей π и плоскостью (0) называются косыми цилиндроидами, если обе направляющие являются кривыми линиями; косыми коноидами - если одна из направляющих - прямая линия; дважды косой плоскостью, если направляющие - скрещивающиеся прямые.

На рисунке 4.13 показан дважды косой цилиндرويد, как линейчатая поверхность с тремя направляющими, из которых две - пространственные кривые и одна прямая.

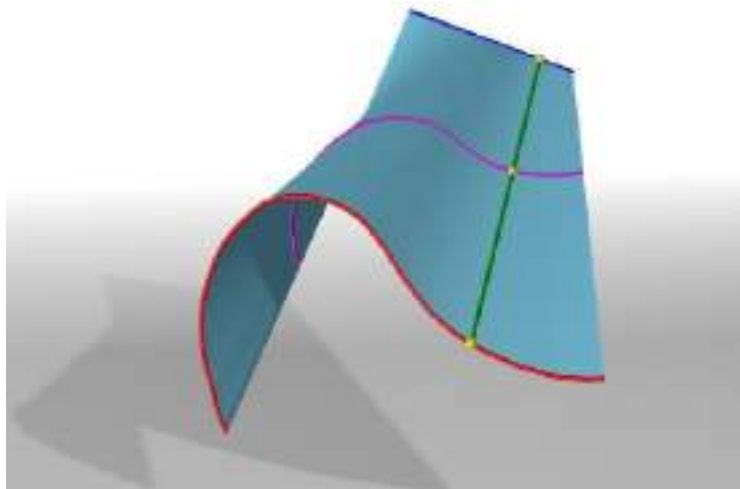


Рисунок 4.13 - Дважды косой цилиндرويد

На рисунке 4.14 показан дважды косой коноид, образованный перемещением образующей прямой по трем направляющим, из которых две - прямые. Показано построение одной образующей, как результата пересечения вспомогательной плоскости, проходящей через одну из прямолинейных направляющих, с двумя другими направляющими.

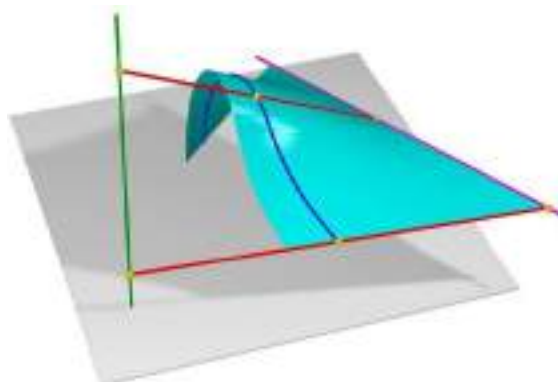


Рисунок 4.14 - Дважды косой коноид

Поверхности с плоскостью параллелизма в аналогичных случаях соответственно называются прямыми цилиндрами, прямыми коноидами и кривой плоскостью.

***Линейчатые поверхности с плоскостью параллелизма
(поверхности Каталана)***

Прямой цилиндр. Прямой цилиндром называется поверхность, образованная движением прямой линии, скользящей по двум криволинейным направляющим, не принадлежащим одной плоскости, и остающейся во всех своих положениях параллельной некоторой заданной плоскости. Эта плоскость называется плоскостью параллелизма.

Через каждую точку поверхности проходит одна образующая. Геометрическая часть определителя цилиндра состоит из двух направляющих кривых линий (m и n) и плоскости параллелизма (π). Алгоритмическая часть определителя состоит из указания о том, что любая образующая поверхности может быть построена как прямая, пересекающая направляющие кривые и параллельная плоскости параллелизма.

Прямой коноид. Прямой коноидом называется поверхность, образованная движением прямой линии, скользящей по двум направляющим, одна из которых - кривая, а вторая - прямая, и остающейся во всех своих положениях параллельной некоторой плоскости параллелизма. Коноид, направляющими которого являются кривая и прямая, а плоскостью параллелизма - плоскость, изображен на рисунке 4.15.

Геометрическая часть определителя коноида состоит из двух направляющих линий (прямой и кривой) и плоскости параллелизма. Алгоритмическая часть определителя состоит из указания о том, что любая образующая поверхности может быть построена как прямая, пересекающая направляющие линии и параллельная плоскости параллелизма.

Кривая плоскость. Кривой плоскостью называется поверхность, образованная движением прямой линии, скользящей по двум скрещивающимся прямым и остающейся во всех своих положениях параллельной некоторой плоскости параллелизма.

Кривая плоскость имеет два семейства прямолинейных образующих и две плоскости параллелизма. Образующие одного семейства -

скрещивающиеся прямые, каждая образующая

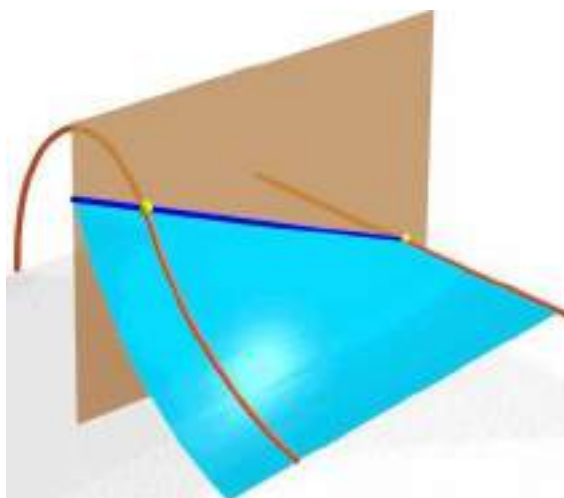


Рисунок 4.15 - Прямой коноид

одного семейства пересекает все образующие второго. Поэтому через каждую точку поверхности проходят две прямолинейные образующие разных семейств (рисунок 4.16).

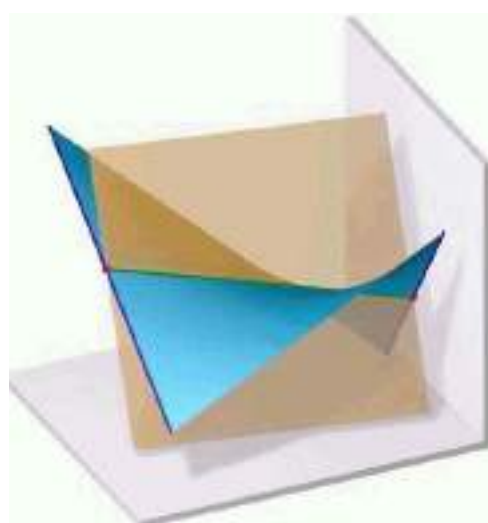
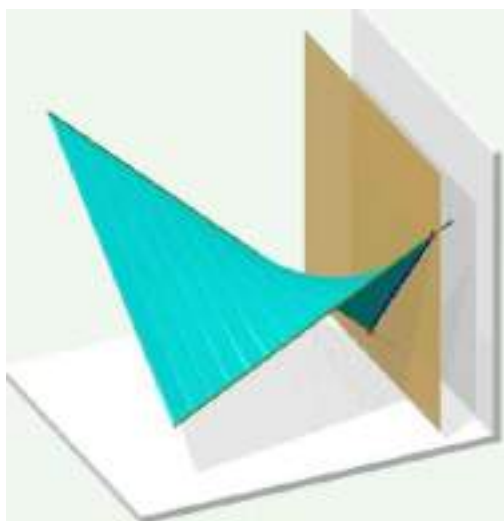
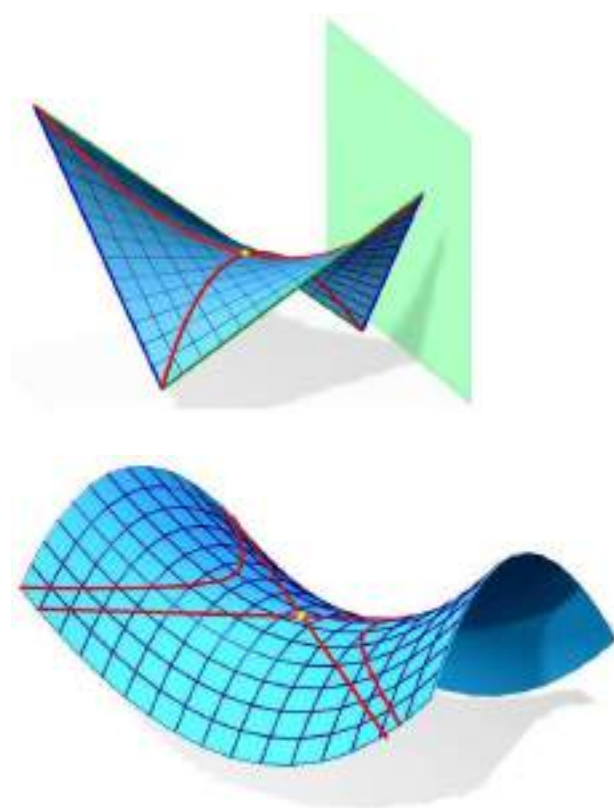


Рисунок 4.16 - Косая плоскость

Косую плоскость называют также гиперболическим параболоидом, так как при пересечении её соответствующими плоскостями в сечении можно получить параболы и гиперболы (рисунок 4.17а).



а

б

Рисунок 4.17 - Гиперболический параболоид и поверхность Каталана

Геометрическая часть определителя кривой плоскости состоит из направляющих прямых и плоскости параллелизма. Алгоритмическая часть определителя состоит из указания о том, что любая образующая поверхности может быть построена как прямая, пересекающая направляющие прямые и параллельная плоскости параллелизма.

Кривая плоскость может быть получена как поверхность Каталана путем плоскопараллельного перемещения одной из парабол, как образующей, по второй параболу, как направляющей. Результат этого кинематического варианта формирования кривой плоскости показан на рисунке 4.17б. На рисунке 4.17б также показан пример гиперболического сечения рассматриваемой поверхности и его вырожденный случай - две прямые, проходящие через "седловую" точку.

Винтовые поверхности

Поверхность, образованная винтовым движением прямой линии, называется линейчатой винтовой поверхностью - геликоидом (винтовое движение характеризуется вращением вокруг некоторой оси i и

поступательным перемещением, параллельным этой оси).

Прямой геликоид. Если в качестве кривой направляющей коноида взять цилиндрическую винтовую линию, в качестве прямой направляющей - ось винтовой линии, а за плоскость параллелизма принять плоскость, перпендикулярную оси винтовой линии, то поверхность, образованная при этих условиях, называется винтовым коноидом или прямым геликоидом (рисунок 4.18).



Рисунок 4.18 - Винтовой коноид (прямой геликоид)

На рисунке 4.19 приведен пример прямого открытого геликоида, имеющего конечную толщину поверхности.



Рисунок 4.19 - Прямой открытый геликоид

Поверхности вращения

Если перемещение образующей линии представляет собой вращение вокруг некоторой неподвижной прямой (оси), то образованная в этом случае поверхность называется поверхностью вращения (рисунок 4.20).

Образующая линия может быть плоской или пространственной кривой, а также прямой. Каждая точка образующей линии при вращении вокруг оси описывает окружность, которая располагается в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Эти окружности называются

параллелями. Следовательно, плоскости, перпендикулярные оси, пересекают поверхность вращения по параллелям. Линия пересечения поверхности вращения плоскостью, проходящей через ось, называется меридианом. Все меридианы поверхности вращения конгруэнтны. Множество всех параллелей или меридианов представляет собой непрерывный каркас поверхности вращения. Через каждую точку поверхности проходит одна параллель и один меридиан.



Рисунок 4.20 - Поверхность вращения

Геометрическая часть определителя поверхности вращения состоит из оси вращения i и образующей линии l . Алгоритмическая часть определителя поверхности вращения состоит из операции вращения образующей l вокруг оси i и построения каркаса параллелей необходимой плотности.

При проектировании различных инженерных сооружений, машин и механизмов наибольшее распространение получили поверхности, образуемые вращением прямой линии и кривых второго порядка.

Поверхности, образуемые вращением прямой (линейчатые поверхности вращения)

(рисунок 4.21).

Вращением прямой линии образуются:

-цилиндр вращения, если прямая l параллельна оси i ;

-конус вращения, если прямая l пересекает ось i ;

-однополостный гиперboloид вращения, если прямая l (BC) скрещивается с осью i .

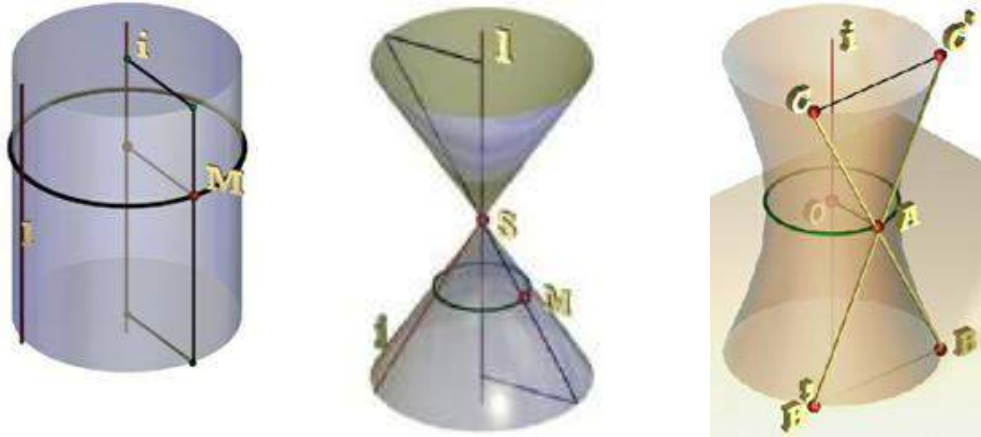


Рисунок 4.21 - Линейчатые поверхности вращения

Поверхность однополостного гиперboloида имеет две образующие линии l (BC) и l' (B'C'), наклоненные в разные стороны и пересекающиеся в точке (A), принадлежащей наименьшей параллели. Отрезок OA является кратчайшим расстоянием между образующей и осью. Таким образом, на поверхности однополостного гиперboloида располагаются два семейства прямолинейных образующих. Все образующие одного семейства - скрещивающиеся прямые. Каждая образующая одного семейства пересекает все образующие другого. Через каждую точку поверхности проходят две образующие разных семейств. Меридианом поверхности является гипербола.

Все рассмотренные линейчатые поверхности вращения являются поверхностями второго порядка.

Поверхности, образуемые вращением кривых второго порядка вокруг их осей.

Сфера образуется вращением окружности вокруг её диаметра.

Эллипсоид вращения образуется вращением эллипса вокруг большой или малой оси.

Параболоид вращения образуется вращением параболы вокруг её оси.

Однополостный гиперboloид вращения образуется вращением гиперболы вокруг её мнимой оси. Эта поверхность образуется также вращением прямой.

Двуполостный гиперboloид вращения образуется вращением гиперболы вокруг её действительной оси.

При вращении асимптот гиперболы образуется конус вращения, который называется асимптотическим по отношению к поверхности гиперboloида.

Все рассмотренные поверхности вращения являются поверхностями второго порядка.

Поверхности, образуемые вращением кривых второго порядка вокруг оси, не являющейся осью кривой, но расположенной в её плоскости. Существует теорема: "При вращении плоской или пространственной алгебраической кривой n -го порядка вокруг произвольной оси образуется алгебраическая поверхность вращения, имеющая в общем случае порядок $2n$ ". Из этой теоремы следует, что при вращении кривой второго порядка вокруг оси, не являющейся осью кривой, но расположенной в её плоскости, образуется поверхность четвертого порядка. Наиболее распространенной поверхностью четвертого порядка является тор (рисунок 4.22).



Рисунок 4.22 - Тор

Тором называется поверхность, образованная вращением окружности вокруг оси, принадлежащей плоскости окружности, но не проходящей через её центр. При этом ось вращения может пересекать окружность, касаться её и располагаться вне окружности. В первых двух случаях тор называется закрытым, в последнем - открытым или кольцом.

Каналовые и циклические поверхности

Каналовой называют поверхность, образованную непрерывным каркасом замкнутых плоских сечений, определенным образом ориентированных в пространстве (рисунок 4.23). Площади этих сечений могут оставаться постоянными или монотонно изменяться в процессе перехода от одного сечения к другому.

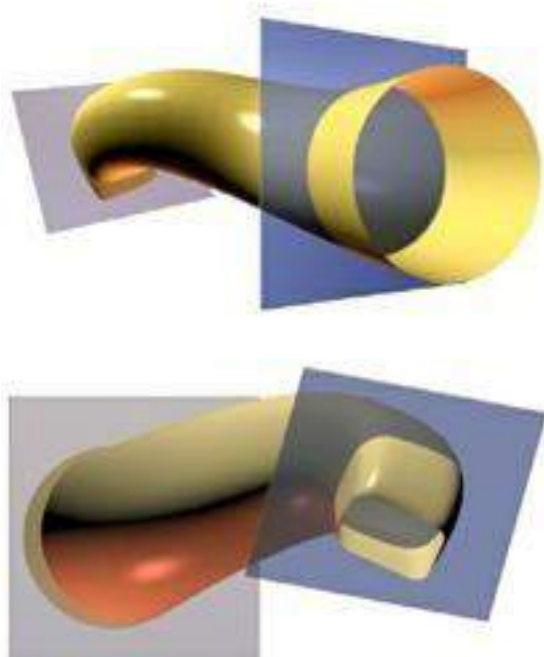


Рисунок 4.23 - Каналовые поверхности

В инженерной практике наибольшее распространение получили два способа ориентирования плоскостей образующих:

- параллельно какой-либо плоскости- каналовые поверхности с плоскостью параллелизма;
- перпендикулярно к направляющей линии - прямые каналовые поверхности.

Каналовая поверхность может быть использована для создания переходных участков между двумя поверхностями типа трубопроводов, имеющих:

- различную форму, но одинаковую площадь нормального сечения;
- одинаковую форму, но различные площади сечения;
- различную форму и различные площади поперечных сечений.

Поверхность Эшера - это каналовая поверхность, направляющей

которой является пространственный трехлистник (рисунок 4.24). Последний можно представить как нить, намотанную по поверхности тора.

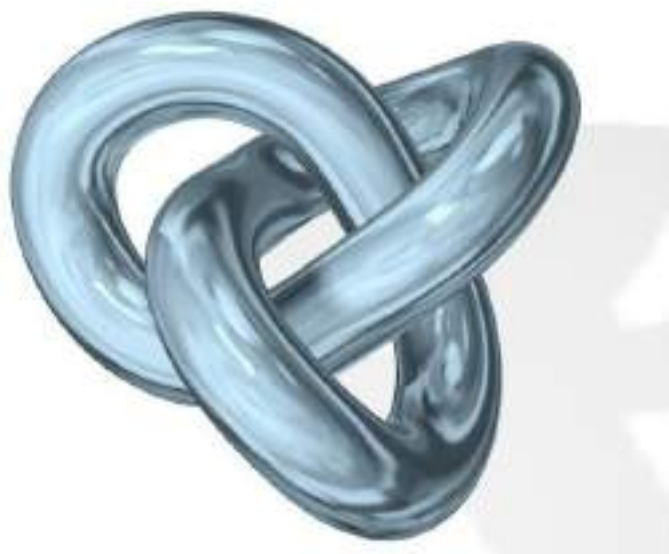


Рисунок 4.24 - Поверхность Эшера

Циклическую поверхность (рисунок 4.25) можно рассматривать как частный случай каналовой поверхности. Она образуется с помощью окружности, центр которой перемещается по криволинейной направляющей. В процессе движения радиус окружности монотонно меняется.

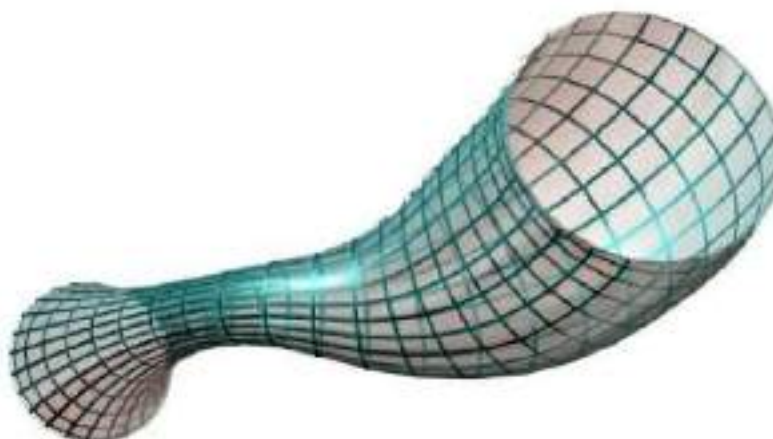


Рисунок 4.25 - Циклическая поверхность

Трубчатая поверхность (рисунок 4.26) относится к группе нелинейчатых поверхностей с образующей постоянного вида и является частным случаем циклической и каналовой поверхностей. Она обладает свойствами, присущими этим видам поверхностей. У циклической

поверхности она позаимствовала форму образующей, а у канальной - закон движения этой образующей.

Кинематический метод построения поверхностей, в частности, канальных поверхностей представлен на рисунке 4.27.



Рисунок 4.26 - Трубчатая поверхность

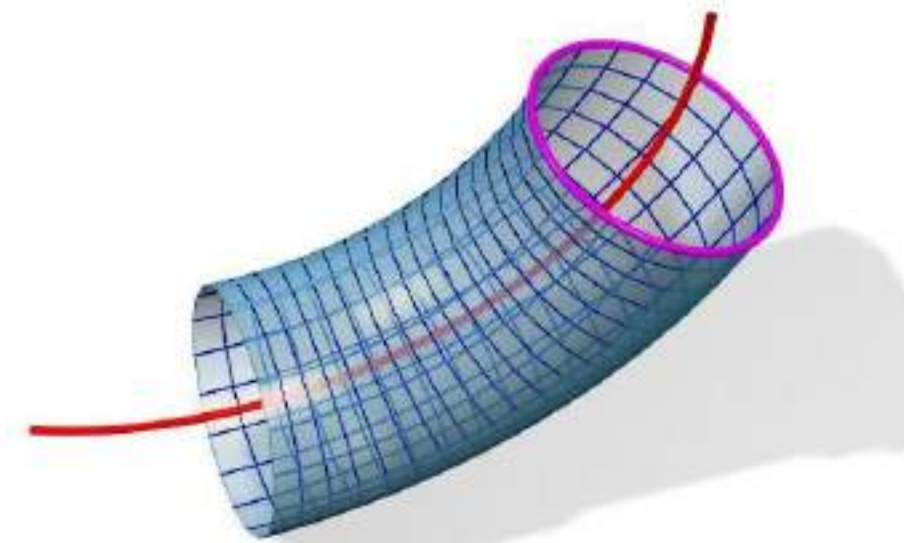


Рисунок 4.27 - Кинематический метод образования поверхности

Развёртки

Поверхность называется развертывающейся, если она путем изгибания может быть совмещена с плоскостью без образования складок и разрывов. При этом исходят из представления поверхности как гибкой, но нерастяжимой и несжимаемой пленки. Свойством развертываемости обладают многогранные поверхности и кривые линейчатые поверхности с ребром возврата: торсы, конические и цилиндрические. Линейчатые косые и нелinearчатые поверхности этим свойством не обладают.

Существуют различные способы построения их условных разверток при помощи аппроксимации.

Плоская фигура, полученная в результате совмещения поверхности с плоскостью, называется разверткой. Между поверхностью и её разверткой существует взаимно-однозначное точечное соответствие (точке A на поверхности соответствует точка A' на развёртке, и наоборот), обладающее следующими свойствами:

- длина участка AB линии l на поверхности равна длине участка $A'B'$ соответствующей ей линии l' на развертке;

- α -угол между кривыми m и n на поверхности равен углу α' между соответствующими им кривыми m' и n' на развертке (углом между кривыми называется угол между касательными к ним в точке пересечения);

- площадь отсека F поверхности равна площади соответствующего ему отсека F' развертки.

В дифференциальной геометрии доказывается, что второе и третье свойства являются следствием первого. Первое свойство вытекает из представления поверхности как гибкой, но нерастяжимой и несжимаемой пленки.

Из рассмотренных свойств следует (рисунок 4.28):

- прямой линии (a) на поверхности соответствует прямая (a') на развертке;

- прямым, параллельным $(a \parallel b)$ на поверхности, соответствуют прямые, параллельные $(a' \parallel b')$ на развертке.

Однако оба указанных свойства обратной силы не имеют, т.е. не всякой прямой на развертке соответствует прямая на поверхности. Примерами этого могут служить цилиндрическая винтовая линия, параллели поверхности вращения. Если кривой линии, принадлежащей поверхности, соответствует прямая на развертке, то эта кривая линия является геодезической для данной поверхности.

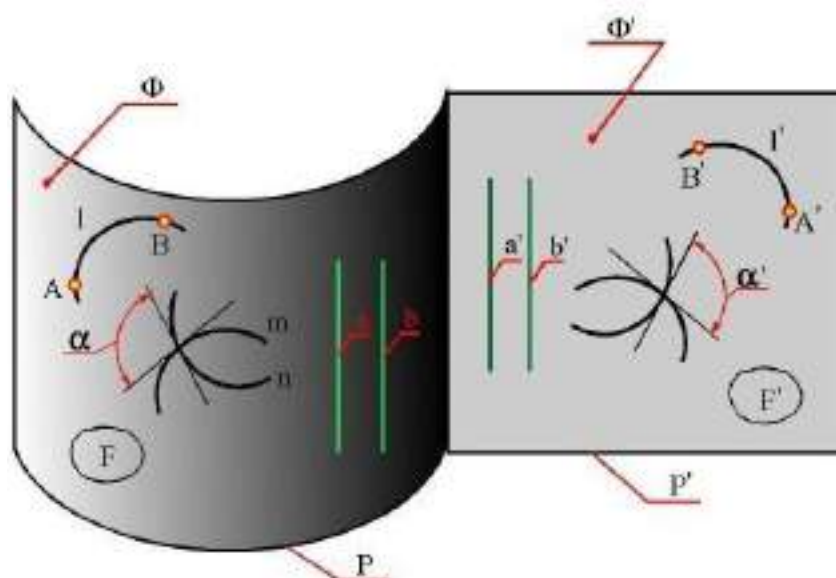


Рисунок 4.28 - Поверхность и ее развертка

Развертка многогранника представляет собой плоскую фигуру, полученную при совмещении всех его граней с плоскостью. Следовательно, построение развертки многогранника сводится к построению истинных величин его граней. Выполнение этой операции связано с определением натуральных величин его ребер, которые являются сторонами многоугольников - граней, а иногда и некоторых других элементов. Ребра многогранника условно разделяются на боковые и стороны основания.

Боковые грани любой пирамиды являются треугольниками (рисунок 4.29). Для построения развертки пирамиды необходимо предварительно определить натуральные величины боковых ребер и сторон основания.

Построение точных разверток кривых развертывающихся поверхностей традиционными методами сложно и, как правило, не вызывается практической необходимостью. Поэтому обычно строят приближенные развертки поверхностей. Основным способом построения приближенных разверток развертывающихся поверхностей (кроме цилиндрических) является способ триангуляции поверхности.

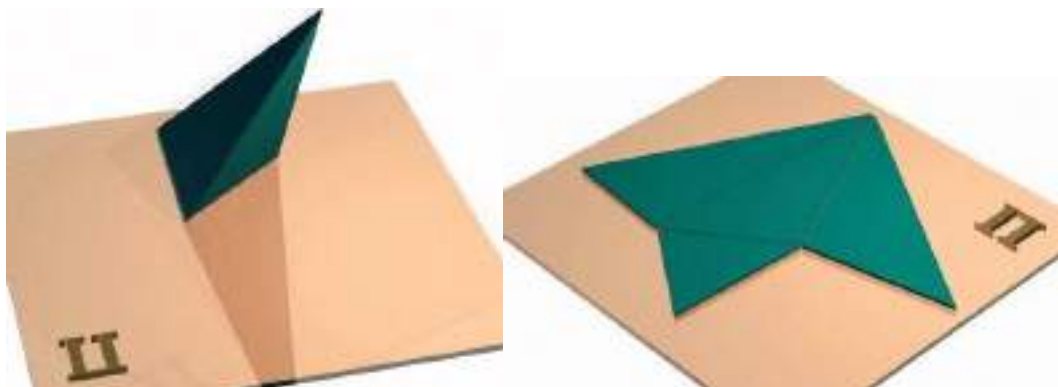


Рисунок 4.29 - Пирамида и ее развертка

Способ триангуляции состоит в том, что кривая поверхность заменяется многогранной поверхностью, состоящей из треугольных граней.

Развертка прямого кругового конуса, образующая которого равна $|l|$ и радиус основания $|r|$, имеет форму кругового сектора с радиусом равным $|l|$ и центральным углом $= 360^\circ |r|/|l|$ (рисунок 4.30).

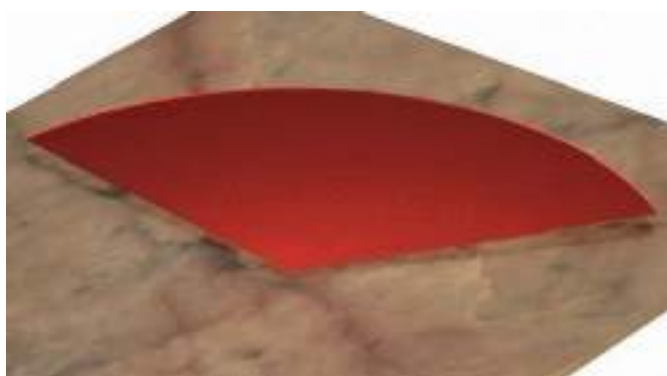
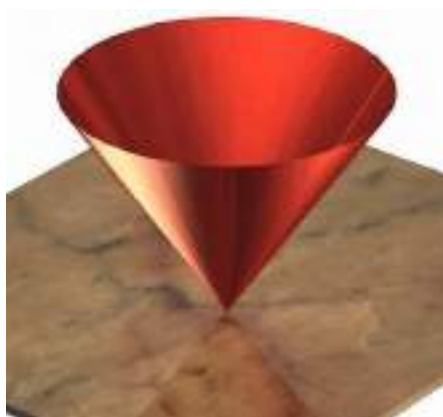


Рисунок 4.30 - Конус и его развертка

При построении разверток цилиндрических поверхностей способ триангуляции, как правило, не применяется. Цилиндрическая поверхность

заменяется (аппроксимируется) вписанной в неё призматической поверхностью, которая определяется ломаной, вписанной в направляющий кривой цилиндр, и направлением образующих. Развёртка этой n -угольной призмы и принимается за развёртку цилиндра. Ломаная линия, получающаяся на развёртке призмы, заменяется плавной кривой. Развёртка боковой поверхности прямого кругового цилиндра представляет собой прямоугольник со сторонами, соответственно равными $2\pi r$ и h , где r - радиус окружности основания цилиндра, а h - его высота (рисунок 4.31).

Развёртку неразвертывающейся поверхности построить нельзя. Для построения условной развёртки такой поверхности применяют метод аппроксимации, который заключается в следующем. Данная неразвертывающаяся поверхность Φ разбивается на некоторые отсеки.

Каждый из этих отсеков заменяется отсеком кривой развертывающейся поверхности. Совокупность всех отсеков развертывающихся поверхностей называется обводом Φ' поверхности Φ . С помощью триангуляции обвод Φ' заменяется обводом Φ'' гранных поверхностей. Развёртка гранных поверхностей, образующих обвод Φ'' , принимается за условную развёртку поверхности Φ . При свёртывании такой развёртки, кроме изгибания, необходимо произвести частичное растяжение или сжатие отдельных её участков.

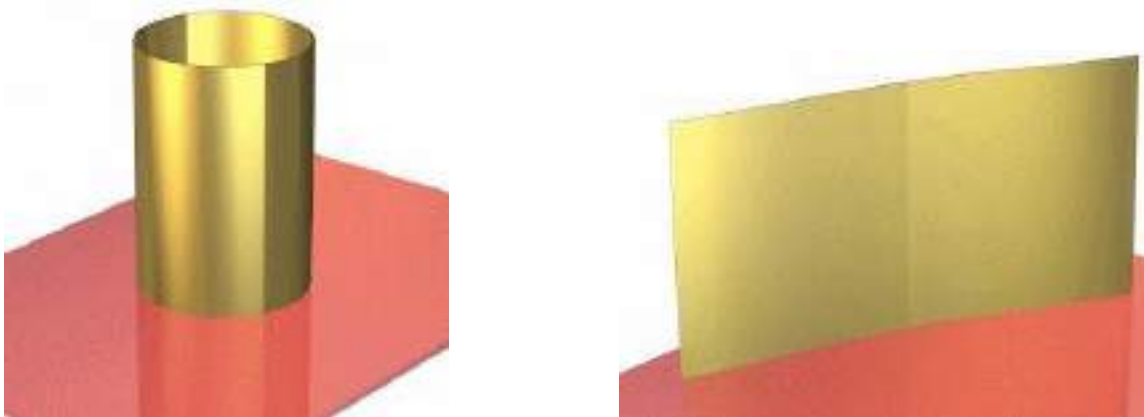


Рисунок 4.31 - Цилиндр и его развёртка

Рассмотрим применение этого способа на примере построения условной развёртки сферы. Разделим поверхность сферы (рисунок 4.32а) на некоторое число (например, шесть) одинаковых отсеков Σ при помощи осевых плоскостей Δ . Поверхность каждого отсека сферы заменим отсеком описанной цилиндрической поверхности. В результате поверхность сферы заменяется обводом (составной поверхностью), составленным из отсеков прямых

круговых цилиндров. Поверхность каждого отсека цилиндрической поверхности заменим отсеком вписанной призматической поверхности (рисунок 4.32б). В результате обвод, составленный из отсеков цилиндров, заменяется обводом, составленным из гранных поверхностей (отсеков прямых призм). Строим развертку каждого отсека призматической поверхности. На чертеже (рисунок 4.32в) показана развёртка одного из них. Затем ломаная 1-3-5-7-... заменяется плавной кривой, проходящей через те же точки (рисунок 4.32г). Полученная фигура принимается за условную развертку отсека сферы. Полная развертка будет состоять из шести таких фигур (рисунок 4.32д).

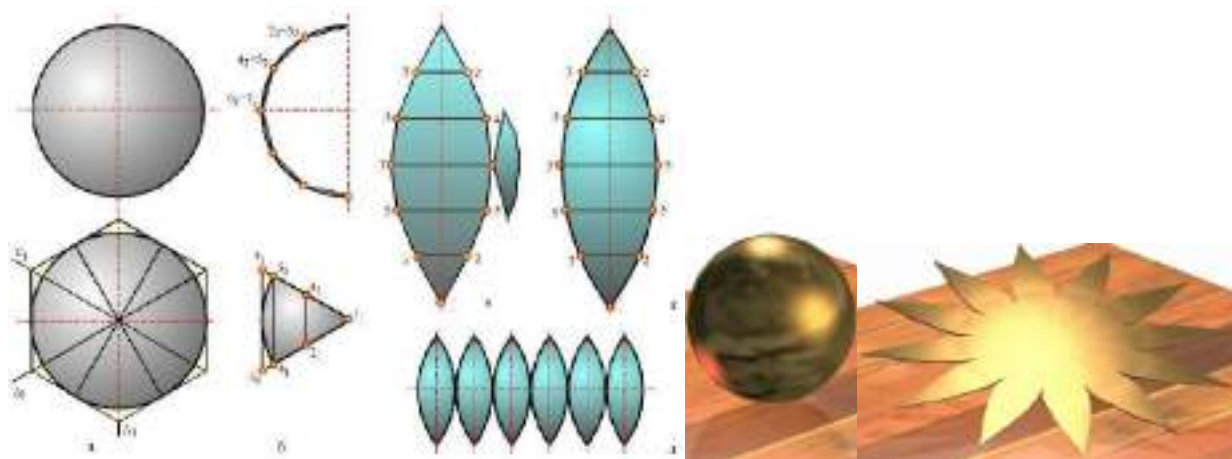


Рисунок 4.32 - Сфера и её развертка

Применяя в качестве аппроксимирующих поверхностей цилиндрические, конические или торсовые поверхности, аналогично можно строить условные развертки других неразвертывающихся поверхностей.

Лекция 16. Ядра геометрического моделирования

Рассмотрим состояние вопроса в хронологической последовательности.

Для начала определимся с понятиями. Что такое геометрическое ядро, какие функции оно реализует, насколько эти функции критичны для пользователей САПР?

Любая САПР представляет собой набор конечно-пользовательских приложений, разделяющих общую платформу, в основе которой лежит несколько базовых технологий, как правило, реализуемых в отдельных модулях, называемых технологическими компонентами. Каждая компонента отвечает за что-то свое: создание и редактирование трехмерной модели, ее визуализацию на дисплее, параметризацию, импорт/экспорт данных в определенном формате и т.д. Такие компоненты разработчики САПР либо

проектируют, кодируют и поддерживают самостоятельно, либо лицензируют их у сторонних технологических поставщиков.

Технологические компоненты - это фундамент, на котором строится здание САПР. От этого фундамента зависит все остальное - возможности различных инструментов, их быстродействие, устойчивость к ошибкам, и даже общая интеллектуальность системы. Заложив в фундамент определенную компоненту, разработчик понимает, что впоследствии заменить ее на другую будет довольно трудно. Часто эта задача решается разборкой старого здания и строительством нового, т.е. выпуском нового поколения (не путать с очередной версией) программного продукта.

С точки зрения программиста каждая компонента - это набор библиотек с программным интерфейсом (API), который позволяет вызывать различные функции из приложения. В случае геометрического ядра речь идет об использовании базовых типов геометрических данных (точка, прямая, кривая, поверхность) и операций с ними (трансформация, проекция, пересечение), моделировании топологии граничной модели, реализации булевых операторов и типичных команд создания и редактирования трехмерных тел и поверхностей (заметание профиля, скругление ребра), построении треугольной сетки и экспорте/импорте данных в разных форматах (родном для ядра или нейтральном IGES/STEP).

Перечисление функций ядра занимает один абзац, но их реализация растягивается на десятки и сотни человеко-лет. Дело в том, что за каждой элементарной операцией (типа пересечения двух NURBS) стоит вычислительный алгоритм, реализация и отладка которого является весьма трудоемкой задачей. А таких операций в ядре - сотни (с учетом разнообразия типов данных, с которыми приходится работать). Далеко не все САПР - разработчики готовы инвестировать в таком объеме в базовую технологию и предпочитают лицензировать готовое ядро, осуществляя компании - разработчику ежегодные платежи (часто включающие определенную сумму с каждой проданной копии конечного продукта). Важно и то, что лицензированное ядро, как правило, уже было «обкатано» в других системах, поэтому обладает богатой функциональностью и высоким уровнем надежности. Наконец, выбрав стороннее ядро, поставщик САПР сможет быстрее закончить разработку своего продукта и вывести его на рынок. Иногда это время является определяющим - если опоздать с релизом на год-другой, то рынок может оказаться занятым конкурентами. Ярчайшим примером является выпуск САПР SolidWorks, ставшей первой системой параметрического твердотельного

моделирования для платформы Windows. Этим же путем впоследствии пошли разработчики MicroStation, T-FLEX, ADEM, SpaceClaim и множества других систем.

Немало и тех, кто ставит на возможность полного контроля над исходным кодом, оперативного исправления ошибок и наращивания функционала, быстрого переноса на новые платформы и готов расплачиваться за это

собственными ресурсами. Этой трудной дорогой идут разработчики CATIA, NX, Creo Elements/Pro, Solid Edge, Autodesk Inventor, think3, КОМПАС-3D.

А началось все в далеком 1965 году, когда в компьютерной лаборатории Кембриджского университета было создано подразделение CAD Group. Эта команда ученых, возглавляемая Чарльзом Лэнгом (Charles Lang), проводила исследования в области создания программных средств, лежащих в основе систем MCAD/CAM. Вскоре к CAD Group присоединился Ян Брэйд (Ian Braid), который начал разрабатывать экспериментальную программу BUILD, систему геометрического моделирования на основе революционной для того времени технологии - граничного представления (BRep).

Здесь придется сделать небольшое отступление, чтобы рассказать об этой инновационной технологии - ведь ныне она лежит в основе большинства современных САПР. Граничные модели хранят информацию о границах объемного тела (гранях, ребрах и вершинах), что позволяет максимально точно описать деталь и рассчитать ее объемно-массовые характеристики. Для простоты манипулирования информация в граничной модели подразделяется на геометрические и топологические данные. Геометрические данные для каждой граничной сущности свои: для вершины - ее координаты, для ребра - параметрическое уравнение пространственной кривой (чаще всего - в виде NURBS - неоднородного рационального В-сплайна), для грани - параметрическое уравнение поверхности (опять же часто в виде NURBS). Топологические данные хранят информацию о смежности вершин и ребер, ребер и граней, а также о внутренних и внешних границах грани. Для удобного манипулирования топологической информацией было предложено несколько структур данных, обобщенно называемых BRep (от англ. Boundary Representation – граничное представление). Над разработкой первой в мире граничной структуры данных, которая позволяла описывать геометрию сложной формы, как раз и трудился в Кембридже Ян Брэйд.

В 1974 году ведущие участники CAD Group образуют компанию Shape Data Ltd., которая начинает разработку первого в мире коммерческого геометрического ядра ROMULUS.

Разработка ведется на языке Fortran и основывается на идеях, обкатанных в экспериментальных программах BUILD I и BUILD II. Вскоре продается первая коммерческая лицензия на ROMULUS. Покупатель - компания Hewlett-Packard - использует ее для создания своей CAD-системы ME30 (наследником которой является CoCreate OneSpace Modeler, ныне принадлежащая компании PTC и недавно переименованная в CREO Elements/Direct). В 1981 г. Shape Data становится частью компании Evans & Sutherland (одним из основателей которой был легендарный САПР-пионер Айвэн Сазерлэнд), а в 1985 году начинает разработку пакета Parasolid - прямого наследника геометрического ядра ROMULUS.

На этого наследника довольно скоро объявился серьезный претендент - компания Unigraphics, которая к тому времени осознала, что твердотельное моделирование на основе конструктивного подхода (CSG) - тупиковый путь

развития. Основной продукт Unigraphics - САПР UniSolids (ныне всем известная под именем NX и принадлежащий Siemens PLM

Software), основанный на собственном CSG-ядре PADL, требовалось перевести на граничное представление твердых тел. Взвесив все варианты, в 1988 г. Unigraphics полностью выкупила Parasolid-бизнес у Evans & Sutherland и начала инвестировать в разработку ядра. Годом позже был выпущен конечно - пользовательский пакет UG/Solids, полностью основанный на Parasolid, но лицензировать Parasolid сторонним разработчикам компания начала лишь с середины 1990-х, когда на время стала частью компании EDS.

Вскоре после начала работы над Parasolid (активно поучаствовав в составлении соответствующего ТЗ) трое ведущих сотрудников Shape Data - Ян Брэйд, Чарльз Лэнг и Алан Грэйер (Alan Grayer) - оставляют компанию и создают собственную под названием Three- Space Ltd., которая начинает разработку принципиально нового геометрического ядра - ACIS.

Разработка идет по заказу компании Spatial Technology (США), которая намеревается использовать ACIS в собственных целях. Дик Соуэр (Dick Sowar), основавший Spatial в 1986 г., сначала планировал использовать новое ядро для своей инновационной САМ-системы Strata, основанной на твердотельном моделировании, но через несколько лет понял, что бизнес по лицензированию самого ядра другим компаниям оказался более выгодным, и свернул остальные разработки. Дик вообще больше верил в перспективы компаний, поставляющих технологии, а не конечно-пользовательские продукты, поэтому инвестировал часть своих средств в проект еще одного кембриджского ученого - Джона Оуэна (John Owen), создавшего на эти деньги D-Cubed для разработки первого в мире коммерческого решателя геометрических ограничений. В дальнейшем базировавшиеся в Кембридже разработчики Three-Space (со временем поглощенной Spatial) и D-Cubed тесно сотрудничали друг с другом, что сыграло решающую роль в развитии событий вокруг ACIS в начале нового века.

Разработка ACIS с самого начала велась на C++, первая версия вышла в 1989 г. (она работала как на UNIX-платформах, так и на MS DOS), а первым покупателем снова стала HP. Вскоре лицензии на ACIS приобрели компании Control Data и Autodesk. Другими крупнейшими клиентами ACIS стали компании Bentley Systems и Intergraph.

За год до образования Spatial произошло одно знаменательное событие, которое вскоре перевернуло всю отрасль САПР: эмигрант из СССР Самуил Гейзберг основал компанию PTC (Parametric Technology Corp.) для разработки Pro/ENGINEER – первой в мире системы параметрического твердотельного моделирования на основе конструктивных элементов (использующей дерево построения для автоматической регенерации модели при внесении изменений). Pro/ENGINEER (ныне известный под именем CREO Elements/Pro) с самого начала базировался на собственном геометрическом ядре, спроектированном специально для поддержки твердотельного моделирования. Компания, впрочем, долго не решалась предложить свое ядро

другим разработчикам, сделав это только в 2001 году. В это время рынок уже принадлежал ACIS и Parasolid, поэтому GRANITE (такое название получило ядро) лицензировался в основном для обмена данными с Pro/E, а не для создания собственных систем твердотельного моделирования. Такое положение это ядро занимает и поныне.

Успех Pro/E (новообразованная компания уже через несколько лет стала лидером отрасли по объемам продаж, став первой в истории САПР - компанией, пробившей планку в \$1 млрд. годового дохода) заставил всех конкурентов срочно реализовывать в своих системах аналогичный функционал. Самыми дальновидными оказались Джон Хёрштик (John Hirshtik) и Майкл Пейн (Michael Payne), которые, покинув PTC, в 1993 году создали собственную

компанию с целью разработки аналога Pro/E для платформы Windows. Стремясь ускорить разработку, они решили не разрабатывать собственное геометрическое ядро, а использовать готовое. Испробовав ACIS, разработчики остались неудовлетворенными его функционалом (многие функции, которые правильно работали в Pro/E, в ACIS давали ошибки). И, поскольку, попытки Майка договориться с руководителями PTC о лицензировании их геометрического ядра окончились неудачей (PTC прозорливо видела в будущем SolidWorks своего конкурента), а реакция Spatial на указанные ошибки в ACIS его не устроила, он решил протестировать Parasolid. В результате оказалось, что на наборе разработанных тестов Parasolid показал себя много лучше ACIS, и один из главных тендеров в мире САПР был решен в его пользу. Без сомнения, в успехе SolidWorks есть немалая заслуга разработчиков Parasolid.

Осознав, насколько выгодным может быть лицензирование своего ядра сторонним разработчикам, на рынок вышла японская компания Ricoh со своим продуктом Designbase. Ricoh использовала это ядро для дизайна своих фотоаппаратов, предъявляя высокие требования к сложности поверхностей. Designbase - первое ядро, в котором поверхности и твердые тела можно проектировать отдельно, легко переходя от одного представления к другому. Кроме того, Designbase использовало концепцию мета - моделирования, позволяющую автоматически создавать историю создания модели, и легко проводить параметрическую модификацию геометрии. В настоящее время ядро Designbase исчезло с рынка технологических компонент, но до сих пор можно встретить САПР, основанные на нем

- это система твердотельного моделирования Helix, распространяемая в Японии компанией Futjitsu, CADRA (SofTech), GMSWorks (C-Solutions) и другие.

Французской компании Dassault Systemes пришлось догонять ушедших вперед конкурентов. Будучи одним из пионеров в области трехмерного проектирования и реализовав возможности твердотельного моделирования еще в четвертой версии CATIA (выпущенной в 1993 г.), компания - как и многие другие старожилы рынка САПР - пропустила появление Windows.

Осознав, что полноценный перенос на новую платформу CATIA 4, написанной на языке Fortran и ориентированной на архитектуру UNIX, невозможен, Dassault решила создать новое поколение CATIA с нуля. Новая разработка, получившая кодовое имя CNext, в 1998 году стала известной всему миру под названием CATIA V5 (после чего потребовалось еще несколько долгих лет на доведение V5 до функционального уровня своей предшественницы). Вместо устаревшего Fortran в качестве языка программирования был выбран C++, а геометрическое ядро новой системы получило название CGM - CNext/CATIA Geometric Modeler и было написано с нуля - ни строки кода из прежней системы в нем не было.

Выпущенная в 2008 г. PLM-платформа V6 базируется на том же геометрическом ядре CGM. Все эти годы ядро непрерывно совершенствовалось и развивалось. С самого начала CGM позволяло моделировать геометрию, состоящую из многообразий разной размерности: нулевых (точки), 1-manifold (криволинейные каркасы), 2-manifold (поверхности) и 3-manifold (твердые тела), произвольно смешивая их в рамках одной модели.

Сделав ставку на новое современное ядро, Dassault выиграла - CATIA V5 и смежные PLM-продукты вывели компанию в абсолютные лидеры мирового рынка САПР (как когда-то PTC). Однако, за это пришлось заплатить высокую цену: данные, созданные в CATIA 4 (основанной на старом ядре), нельзя полноценно использовать в V5. Точнее расплатиться

пришлось крупнейшему клиенту Dassault – концерну Airbus, который, проектируя самый большой пассажирский самолет A380 одновременно в четвертой и пятой версиях CATIA, сорвал все сроки с вводом его в эксплуатацию и понес убытки в размере \$6 млрд. Причина – ошибки при переносе геометрических моделей между разноядерными САПР.

Никто и не думал, что геометрическое ядро CATIA (святая святых компании) когда-нибудь будет доступно для лицензирования. Но летом 2010 г. компания всех удивила, начав через свою дочернюю структуру Spatial предлагать CGM всем желающим (конечно, для этого пришлось изменить расшифровку первой буквы: “С” теперь не “CATIA”, а “Convergence”). Таким образом, последнее ядро из «большой четверки» (Parasolid, ACIS, GRANITE, CGM) стало доступно для лицензирования.

Впрочем, CGM было не единственным французским ядром твердотельного моделирования. Еще в начале 1990-х другая компания из этой страны - Matra Datavision - начала работу над средой CAS.CADE, набором компонент, лежащих в основе САПР. Первым основанным на нем продуктом стала CAD/CAM - система EUCLID QUANTUM, выпущенная Matra в 1996 г. Впрочем, особого успеха на рынке она не снискала, а в 1999 Dassault Systemes выкупила у Matra большую часть САПР-бизнеса. Так как ядро CAS.CADE осталось невостребованным (у Dassault в руках уже было собственное ядро CGM), то Matra приняла решение опубликовать его исходный код и организовать сервисную компанию для обслуживания разработчиков,

решившихся взять это ядро за основу своих продуктов. Так появился Open CASCADE.

Бизнес, основанный на открытом коде, давно доказал свою эффективность. Одно из подтверждений тому - судьба компании Open CASCADE SAS, которая, сменив несколько владельцев, по-прежнему продолжает свое существование: последний на сегодняшний день релиз ядра (6.4) датируется октябрём 2010 г.

Многие другие компании предпринимали попытки разработки геометрических ядер, но заметных результатов не достигли. Можно, например, вспомнить XOX Corporation со своим ядром Shapes (которое использовалось в первых версиях CADKEY, будучи затем заменено на ACIS). Американская компания IntegrityWare с 1996 г. разрабатывает набор библиотек для геометрических вычислений. С 1998 г. их распространением (под именем SMLib) занимается компания Solid Modeling Solutions, которая предлагает каждому купившему лицензию не только объектный, но и исходный код ядра вместе с правом модифицировать его в своих целях. А в 2004 г. IntegrityWare выпустила ядро геометрического моделирования SOLIDS++. Реализованное на языке программирования C++, ядро имеет модульную архитектуру, поддерживает в рамках одной модели топологию разной размерности, обладает настраиваемыми геометрическими допусками, позволяет выполнять триангуляцию модели, реализует скругления вершин со сложной топологией, может моделировать поверхности с контролем кривизны G2 и G3. Впрочем, о коммерческих САПР, созданных на этом ядре, пока ничего не известно.

Глядя на успехи англичан, французов, американцев и японцев, отечественные разработчики не могли сидеть, сложа руки. Движение возглавила компания АСКОН, выпустившая в 2000 г. первую версию КОМПАС-3D, полностью основанную на собственном геометрическом ядре. В 2002 почин поддержали в НТЦ АПМ, где создали собственное ядро АРМ Engine, используемое в системе твердотельного и поверхностного моделирования АРМ

Studio. Впрочем, оба этих ядра не предлагаются для лицензирования сторонним разработчикам.

С 2007 г. Правительство РФ осуществляет федеральную целевую программу

«Национальная технологическая база» с целью создания новых передовых технологий и оборудования, внедрения разработанных технологий в производство, коммерциализации новых технологий, создания перспективного научно-технологического задела для разработки перспективной наукоемкой продукции, решения проблем улучшения экологической ситуации в стране.

В рамках этой программы Министерство промышленности и торговли РФ объявило тендер на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы

«Создание отечественного лицензируемого программно-математического ядра трехмерного моделирования как базы для компьютерных систем автоматизированного проектирования сложной машиностроительной продукции». Такое ядро, будучи положено в основу нового поколения компьютерных систем проектирования, инженерного анализа, подготовки производства, создания технической документации, будет способствовать созданию российской промышленностью инновационных изделий, конкурентоспособных на мировом рынке, став частью национальной технологической базы.

Победителем тендера стало федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», под руководством которого группа организаций в рамках проекта "Гербарий" (с 2011 по 2013 г.г.) разработала ядро RGK.

Конкуренция на рынке геометрических ядер между ACIS, Parasolid и Designbase, сложившаяся во второй половине 1990-х годов, привела к тому, что многие поставщики САПР получили возможность выбора: если они были не удовлетворены качеством используемого ядра или уровнем поддержки со стороны компании-разработчика, то могли сменить поставщика. Этой возможностью воспользовались Bentley Systems и Intergraph, переведя свои САПР - MicroStation и Solid Edge соответственно - с ACIS на Parasolid.

Компания 3D/EYE, разработчик IRONCAD, пошла еще дальше: встроив в 1995 г. в свою систему ядро ACIS, в 1999 она добавила туда Parasolid, разрешив пользователям свободно переключаться между ними. Система до сих пор сохраняет такую архитектуру, что помогает пользователям сократить затраты при работе с импортированной геометрией (созданной в другой САПР). Разные геометрические ядра обычно по-разному трактуют геометрические допуски, с разной точностью вычисляют пересечения кривых и поверхностей, в результате чего вполне корректная модель при переносе ее в систему, основанную на другом ядре, становится неработоспособной из-за многочисленных ошибок, которые приходится исправлять в полуавтоматическом режиме.

Компания Dassault пошла дальше. Приобретя в 2000 г. компанию Spatial, французы получили в свое распоряжение ядро ACIS – в дополнение к CGM, лежащему в основе CATIA, и лицензированному Parasolid, работающему в составе SolidWorks. Но руководители Dassault и не думали использовать ACIS в своих САПР. Вместо этого они поставили руководить Spatial Майкла Пейна, основателя SolidWorks, которому поручили провести переговоры с Autodesk – основным лицензиатом ACIS.

Изучив дела Spatial, Майк быстро понял, почему от этого ядра отказались Bentley и Intergraph (продукт был ненадежным, по возможности он был полуфабрикатом, служба поддержки клиентов не существовала, цены все были разными в зависимости от того, сколько кто-то будет в состоянии заплатить в конце квартала, была нулевая система проверки качества).

На встрече с руководителем Autodesk Кэрл Барц Майк пообещал исправить ситуацию. Впрочем, в самой Autodesk тогда посчитали, что Майк, напротив, шантажирует их, угрожая вовсе прекратить развитие ядра, если Autodesk не примет предложение Dassault стать реселлером SolidWorks, убрав с рынка свой конкурирующий продукт Inventor. В результате Autodesk воспользовалась условием лицензионного соглашения и после единовременной выплаты \$6.5 млн. получила в свое распоряжение исходный код ACIS. Взяв его за основу, компания приступила к разработке собственного геометрического ядра, получившего название Shape Manager. Ответ на вопрос, где взять квалифицированных программистов для этой специфической работы, долго искать не пришлось - конечно в Кембридже, где же еще! Заключив соглашение с D-Cubed, Autodesk отдала эту разработку на аутсорсинг фактически авторам ACIS (разобраться в генетических связях Spatial и D-Cubed практически невозможно; можно лишь сказать, что компании тесно сотрудничали с 1986 г., а их ключевые сотрудники работали рука об руку в той самой CAD-лаборатории Кембриджского университета). Spatial подала на Autodesk в суд, но проиграла. Таким образом, кембриджское дерево принесло свой пятый плод (BUILD, ROMULUS, Parasolid, ACIS, Shape Manager).

Ядерные войны на этом закончились. А ядро ACIS, кстати, вполне успешно развивается в рамках Dassault. Регулярно выходят новые релизы, наращивается функционал по поддержке прямого редактирования геометрии. Неутомимый Майк Пейн, покинув Dassault, основал SpaceClaim, построив систему в этот раз не на Parasolid, а на ACIS. И благодаря личному знакомству разработчиков двух компаний, у них получилась отличная совместная работа, результатом которой теперь могут воспользоваться все клиенты Spatial. Не случайно, большинство систем прямого моделирования (SpaceClaim, KeyCreator, IRONCAD и частично Creo Elements/Direct) построены на ACIS.

Подведем итог. В таблице 1 представлены упомянутые геометрические ядра, включая те, которые никогда не были доступны для лицензирования сторонним разработчикам.

Таблица 1

Программные продукты и ядра геометрического моделирования

Продукт	Производитель	Область	3D-ядро
4MCAD IntelliCAD	4M S.A., Греция	CAD, AEC	Open CASCADE Technology
Adams	MSC Software, США	CAE	Parasolid
ADEM	Группа компаний ADEM, Россия-Израиль- Германия	CAD, CAM, CAPP	ACIS

ADINA Modeler	ADINA R&D Inc., США	CAE	Parasolid и Open CASCADE Technology
Alibre Design	3D Systems, США	MCAD	ACIS
Allplan	Nemetschek AG, Германия	AEC/BIM	SMLib
AMPSolid	AMPS Technologies, США	CAE	ACIS
ANSYS	ANSYS Inc., США	CAE	ACIS и Parasolid
APM Studio	НТЦ АПМ, Россия	MCAD	Собственное (APM Engine)
ArchiCAD	Graphisoft, Венгрия	AEC/BIM	Собственное
ARES	Graebert, Германия	CAD	ACIS
Ashlar-Vellum Cobalt, Xenon, Argon	Ashlar-Vellum, США	MCAD	ACIS
AutoCAD	Autodesk, США	CAD, AEC, GIS	Собственное (ASM), совместимое с ACIS
Autodesk Inventor	Autodesk, США	MCAD	Собственное (ASM), совместимое с ACIS
Autodesk Moldflow	Autodesk, США	CAE	Parasolid
Autodesk Revit Architecture	Autodesk, США	AEC/BIM	Собственное (ASM), совместимое с ACIS
bonzai3d	AutoDesSys, США	CAD	ACIS в комбинации с собственным ядром
Bricscad	Bricsys NV, Бельгия	AEC, MCAD	ACIS
BtoCAD	YuanFang Software Co., Ltd., Китай	CAD	ACIS
CADopia	CADopia Inc., США	CAD	ACIS
CATIA	Dassault Systemes, Франция	CAD/CAM/CAE, AEC	CGM

Cimatron	Cimatron Limited, Израиль	CAM	ACIS
CollabCAD	National Informatics Centre, Индия	CAD/CAM	Open CASCADE Technology
Creo (прежнее название – Pro/Engineer)	Parametric Technology, США	MCAD	GRANITE
Creo Elements/Direct Modeling (прежнее название – CoCreate)	Parametric Technology, США	CAD	ACIS
Edgecam	Planit Software, Великобритания	CAM	Parasolid и GRANITE
ESPRIT	DP Technology Corp., США	CAM	Parasolid
form-Z	AutoDesSys, США	CAD	ACIS в комбинации с собственным ядром
FreeCAD	Открытый онлайн-проект	CAD	Open CASCADE Technology
GibbsCAM	Cimatron, Израиль	CAD/CAM	Parasolid и GRANITE
GstarCAD	Suzhou Gstarsoft Co., Ltd, Китай	CAD	ACIS
IRONCAD	IronCAD LLC, США	MCAD	ACIS и Parasolid
KeyCreator	Kubotek USA Inc., Япония-США	CAD	ACIS
КОМПАС-3D	АСКОН, Россия	MCAD, AEC	Собственное ядро (C3D)
Mastercam	CNC Software, США	CAD/CAM	ACIS
Masterwork	Tecnos G.A., Италия	CAM	Open CASCADE Technology
MicroStation	Bentley Systems, США	AEC	Parasolid (ранние версии – ACIS)
Moment of Inspiration	Triple Squid Software Design, США	CAD	SOLIDS++
NX	Siemens PLM Software, Германия	CAD/CAM/CAE	Parasolid

Patran	MSC Software, США	CAE	Parasolid
Power NURBS	Ideate Inc., США	CAD	SOLIDS++
PowerSHAPE	Delcam plc, Великобритания	CAD/CAM	Parasolid
progeCAD	progeCAD Srl Uninominale, Италия	CAD	ACIS
Radan	Planit, Великобритания	CAD/CAM	ACIS
Rhinoceros	Robert McNeel and Associates, США	CAD	SOLIDS++ (отдельные модули)
Shark LT	Encore, США	CAD	ACIS
SmartCAM	SmartCAMcnc	CAM	ACIS
Solid Edge	Siemens PLM Software, Германия	MCAD	Parasolid (ранние версии – ACIS)
SolidWorks	Dassault Systemes, Франция	MCAD	Parasolid
SpaceClaim	SpaceClaim Corp., США	MCAD	ACIS
STAR-CCM+	CD-adapco, Великобритания- США	CAE	Parasolid
StruCad	AceCad Software, Великобритания	AEC/BIM	Собственное
T-FLEX	Топ Системы, Россия	MCAD	Parasolid
ThinkDesign	Versata, США	MCAD	Собственное ядро
TopSolid	Missler Software, Франция	CAD/CAM	Parasolid
TurboCAD	IMSI/design, США	AEC, MCAD	ACIS
Vectorworks	Nemetschek, Германия	AEC	Parasolid (ранние версии – SMLib)
ViaCAD 2D/3D	Encore, США	CAD	ACIS
ZW3D (прежнее название – VX CAD/CAM)	ZWCAD Software, Китай	MCAD	Собственное ядро (VX Overdrive)
ZWCAD	ZWCAD Software, Китай	CAD	ACIS

Лекция 17. Параметрическое моделирование

Процесс проектирования и конструирования, как правило, итеративный и предполагает перебор нескольких вариантов, поэтому упрощение и автоматизация построения модели будущего изделия являются одной из важнейших задач САПР.

Одним из широко распространенных методов решения этой задачи является параметрическое проектирование (или просто параметризация), основанное на моделировании деталей и изделий с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время перебрать с помощью изменения параметров или геометрических отношений различные конструктивные схемы, выбрать оптимальные решения и избежать принципиальных ошибок.

Определить цель конструирования достаточно просто, однако процесс поиска рационального решения сложен и требует гармоничного сочетания различных методов автоматизированного конструирования изделий. Параметрическое конструирование как методология автоматизированной разработки является основой для параллельного ведения проектно-конструкторских работ и позволяет уточнить конечную цель конструирования уже на ранних стадиях реализации проекта, что и определяет эффективность совмещения процессов конструирования, инженерного анализа и производства на едином временном интервале и их взаимной интеграции. Параметризация подразумевает использование различных видов взаимосвязей между компонентами модели и приложениями, которые используют данную модель.

Использование технологии параметрического конструирования позволяет, при необходимости, легко изменять форму модели, в результате чего пользователь имеет возможность быстро и эффективно получать альтернативные конструкции или пересмотреть концепцию изделия в целом. При отсутствии средств обеспечения параметрического конструирования модель определена однозначно только своей геометрией, поэтому внесение даже малейших изменений требует значительных трудовых затрат. Изменения же параметрической модели выполняются так же легко, как и изменения значения размеров на чертежах.

Параметризация - концепция, которая охватывает все методы для решения задач конструирования. Важной особенностью современной концепции параметрического конструирования является прежде всего возможность создания геометрической модели с использованием связей и правил, которые могут переопределяться и дополняться на любом этапе ее создания. Связи представляются в виде размерных, геометрических и алгебраических соотношений. Правила же определяются как условия выполнения базовой операции (например, сквозное или «глухое» отверстие).

Параметрическое проектирование существенно отличается от обычного двумерного черчения или трехмерного моделирования. В случае параметрического проектирования создаётся по сути математическая модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации и размеров деталей, их взаимного расположения в сборках и т. п.

На практике применяется достаточно много различных методов параметризации, на сегодняшний день нет однозначно преобладающего решения. Рассмотрим наиболее часто применяемые на практике методы.

Табличная параметризация

Табличная параметризация заключается в создании таблицы параметров типовых деталей (рисунок 6.1). Создание нового экземпляра детали производится путем выбора из таблицы типоразмеров. Возможности табличной параметризации весьма ограничены, поскольку задание произвольных новых значений параметров и геометрических отношений обычно невозможно.

Однако табличная параметризация находит широкое применение во всех параметрических САПР, поскольку позволяет существенно упростить и ускорить создание библиотек стандартных и типовых деталей, а также их применение в процессе конструкторского проектирования.

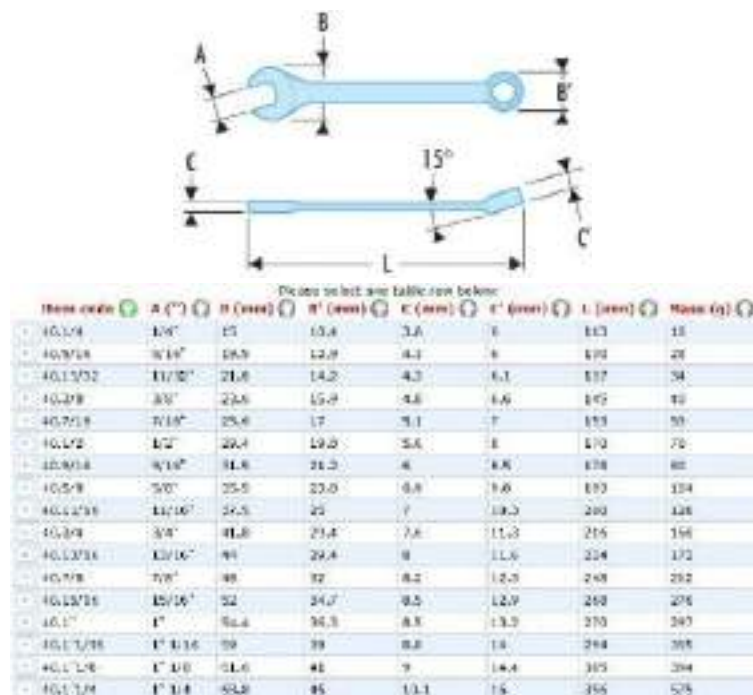


Рисунок 6.1 - Табличная параметрическая модель гаечного ключа

Иерархическая параметризация

Иерархическая параметризация (параметризация на основе истории построений) заключается в том, что в ходе построения модели вся последовательность построения отображается в отдельном окне в виде «дерева построения» (рисунок 6.2). В нем перечислены все существующие в модели вспомогательные элементы, эскизы и выполненные операции в порядке их создания.

Помимо «дерева построения» модели, система запоминает не только порядок ее формирования, но и иерархию ее элементов (отношения между элементами). (Например, сборки => под сборки => детали). Параметризация на основе истории построений присутствует практически во всех САПР, использующих трехмерное твердотельное параметрическое моделирование. Обычно такой тип параметрического моделирования сочетается с вариационной и/или геометрической параметризацией.

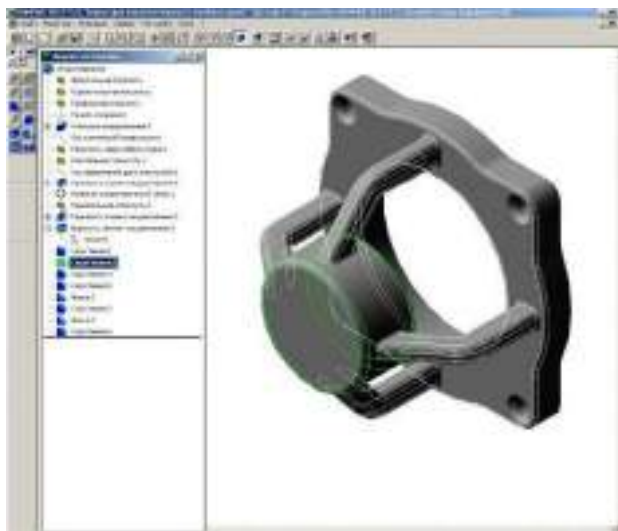


Рисунок 6.2 - Геометрическая модель с «деревом построения»

Вариационная (размерная) параметризация

Вариационная, или размерная, параметризация основана на построении эскизов (с наложением на объекты эскиза различных параметрических связей) и наложении пользователем ограничений в виде системы уравнений, определяющих зависимости между параметрами (рисунок 6.3).

Процесс создания параметрической модели с использованием вариационной параметризации выглядит следующим образом:

1. На первом этапе создается эскиз (профиль) для трехмерной операции. На эскиз накладываются необходимые параметрические связи.
2. Затем эскиз «образмеривается». Уточняются отдельные размеры профиля. На этом этапе отдельные размеры можно обозначить как переменные (например, присвоить имя Length) и задать зависимости других размеров от этих переменных в виде формул (например, Length/2).

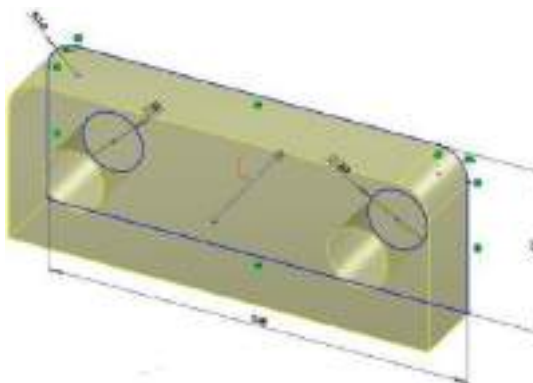


Рисунок 6.3 - Геометрическая модель с вариационной параметризацией

3. Затем производится трехмерная операция (например, смещение),

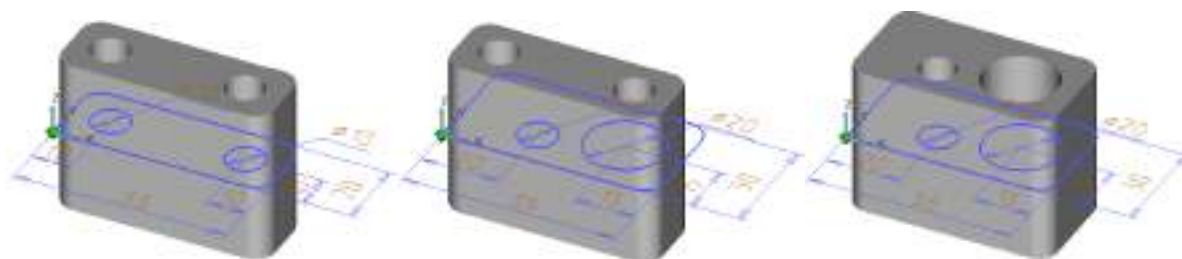
значение атрибутов операции тоже служит параметром (например, величина смещения).

4. В случае необходимости создания сборки взаимное положение компонентов сборки задается путем указания сопряжений между ними (совпадение, параллельность или

перпендикулярность граней и ребер, расположение объектов на расстоянии или под углом друг к другу и т. п.).

Вариационная параметризация позволяет легко изменять форму эскиза или величину параметров операций, что позволяет удобно модифицировать трехмерную модель.

Частным случаем размерной параметризации является так называемая "эвристическая" параметризация, когда последовательно выполняется эскиз, который "образмеривается"; операцией смещения получают геометрическую модель (рисунок 6.4а). Затем производят редактирование значений размеров и выполняют операцию "эвристическая параметризация", в результате которой происходит автоматическое изменение геометрии профиля (рисунок 6.4б). Результат (рисунок 6.4в)



получают после регенерации объёмной модели.

а

б

вРисунок 6.4 -

"Эвристическая" параметризация

Геометрическая параметризация

Геометрической параметризацией называется параметрическое моделирование, при котором геометрия каждого параметрического объекта пересчитывается в зависимости от положения родительских объектов, его параметров и переменных.

Параметрическая модель в случае геометрической параметризации состоит из элементов построения и элементов изображения (рисунок 6.5). Элементы построения (конструкторские или вспомогательные линии) задают параметрические связи. К элементам изображения относятся линии изображения (которыми обводятся конструкторские линии), а

также элементы оформления (размеры, надписи, штриховки и т. п.). Одни элементы построения могут зависеть от других элементов построения.

Элементы построения могут содержать и параметры (например, радиус окружности или угол наклона прямой). При изменении одного из элементов модели все зависящие от него элементы перестраиваются в соответствии со своими параметрами и способами их задания.

Процесс создания параметрической модели методом геометрической параметризации выглядит следующим образом:

1. На первом этапе конструктор задает геометрию профиля конструкторскими линиями, отмечает ключевые точки.
2. Затем проставляет размеры между конструкторскими линиями. На этом этапе можно задать зависимость размеров друг от друга.
3. Затем обводит конструкторские линии линиями изображения - получается профиль, с которым можно осуществлять различные трехмерные операции.

Последующие этапы в целом аналогичны процессу моделирования с использованием метода вариационной параметризации.

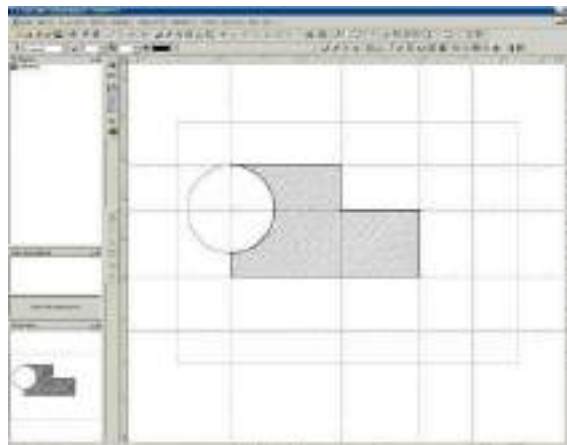


Рисунок 6.5 - Геометрическая параметризация основного контура с использованием направляющих линий

Геометрическая параметризация обеспечивает возможность более гибкого редактирования модели. В случае необходимости внесения незапланированного изменения в геометрию модели необязательно удалять исходные линии построения (это может привести к потере ассоциативных взаимосвязей между элементами модели), можно провести новую линию построения и перенести на нее линию изображения.

Ассоциативное конструирование

Ассоциативное конструирование (Associative Design) - это

обобщающее название технологии параметрического конструирования, обеспечивающей единую, в том числе и двустороннюю, информационную взаимосвязь между геометрической моделью, расчетными моделями, программами для изготовления изделия на станках с ЧПУ, конструкторской документацией, базой данных проекта.

Использование технологии ассоциативного конструирования позволяет, при необходимости, изменять форму модели и получать автоматически перестроенные чертежи (рисунок 6.6) или траектории инструмента для обработки на станках с ЧПУ.

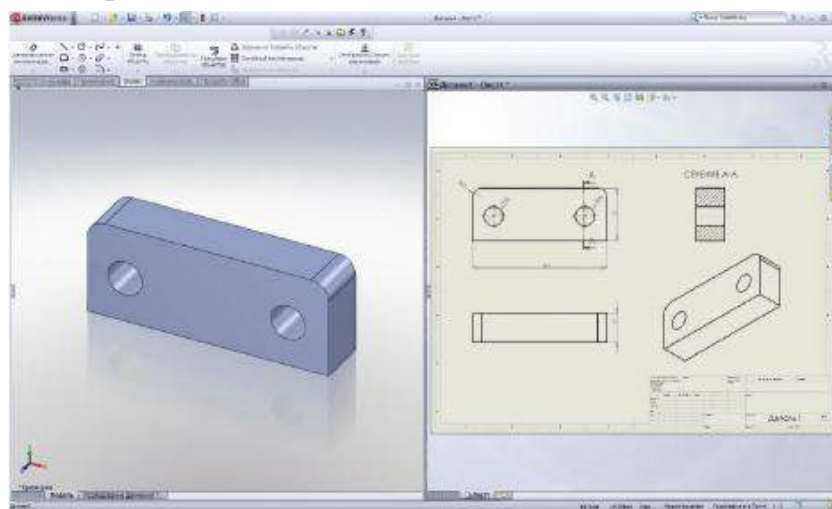


Рисунок 6.6 - Конструкторский чертеж, ассоциативно связанный с геометрической моделью

Частным случаем ассоциативного конструирования является технология ассоциативной геометрии, иногда именуемая как направленная ассоциативность (idirected associativity), - это технология ассоциативного конструирования, которая базируется на непосредственных взаимосвязях между объектами. Простейший пример - определение параллельности двух отрезков. Отрезок А может быть определен как параллельный отрезку В. В результате при перемещении отрезка В отрезок А также изменит свое положение с сохранением ориентации по отношению к отрезку В. Собственное же положение отрезка А не может быть непосредственно изменено. Можно определить отрезки А и В как параллельные и другим способом, так что можно будет изменять положение любого из этих отрезков, удовлетворяя условиям других наложенных связей, - это случай так называемой «мягкой» ассоциативности. Преимущество использования ассоциативной геометрии - скорость.

Недостаток же заключается в том, что пользователь должен полностью определить размеры и ориентацию элемента, прежде чем приступить к созданию следующего элемента.

Объектно-ориентированное конструирование

Объектно-ориентированное конструирование (Feature-Based Modeling) основано на том, что конструктивные элементы геометрии "фьючерсы" (features) представляют собой объекты с предопределенным поведением и структурой данных. Это один из подходов ассоциативного конструирования, с помощью которого определяется поведение геометрической формы при дальнейших изменениях.

Этот подход реализован на основе определенного набора правил и атрибутов, задаваемых при выполнении базовой операции, в дополнение к уже заданным связям и ассоциативной геометрии. Базовые операции являются высокоэффективным инструментом для создания геометрической модели конструкции, инженерного анализа или изготовления. Объектно-ориентированное моделирование предоставляет в распоряжение пользователя макрофункции, ранее определенные как последовательность действий, использующих булевы операции. Например, сквозное отверстие (рисунок 6.7) - может быть представлено как булева операция вычитания и цилиндр достаточной длины, большей, чем текущая толщина детали.

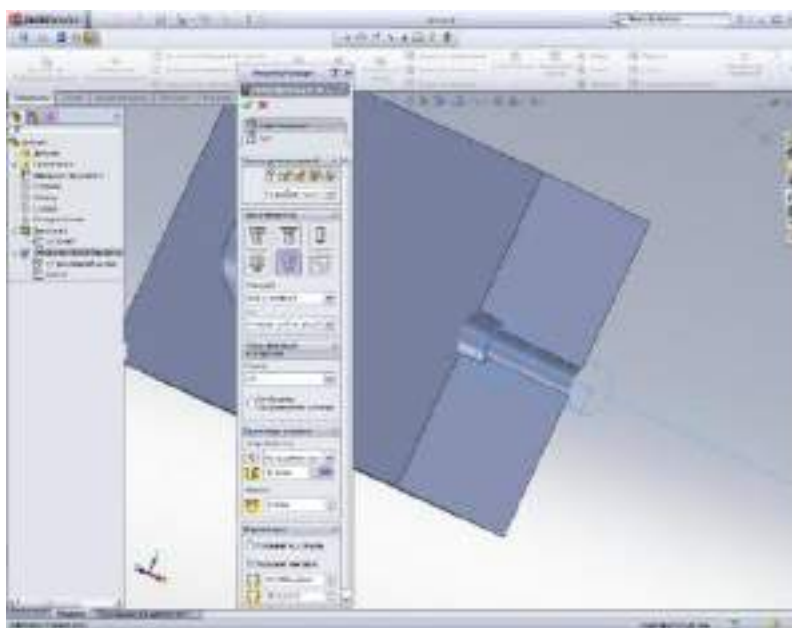


Рисунок 6.7 - Конструирование отверстия как специального объекта построения

Но если модель станет толще, то цилиндр уже не будет обладать достаточной длиной и отверстие превратится в «глухое». Однако под сквозным отверстием понимается дополнительное правило, которое определяет сквозной проход в указанном месте через тело модели, независимо от того, изменилась форма модели или нет. Базовые операции также могут иметь и дополнительные атрибуты, которые используются в других приложениях, таких как анализ и изготовление.

Обязательные требования к базовым операциям при объектно-ориентированном моделировании:

1) используемая базовая операция должна быть полностью определена. После выполнения базовой операции ее топология должна сохраняться и распознаваться как базовая операция (отверстие, паз и т. д.), а также предоставлять возможность изменения определяющих ее геометрических параметров (диаметр, глубина, и т. д.);

2) определение базовой операции должно включать в себя правила, определяющие поведение геометрической формы, а также средства контроля за соблюдением этих правил после выполнения базовой операции. Например, сквозное отверстие должно оставаться таковым, в то время как форма модели подвергается изменению;

3) для повышения эффективности процесса параллельной разработки приложения для инженерного анализа и изготовления должны иметь доступ к описанию объекта, не требуя при этом от пользователя информации об объекте, использованной ранее при выполнении базовой операции.

Уже существующие типы конструктивных элементов могут быть использованы для создания новых типов путем наследования всех свойств исходных объектов и добавления новых атрибутов и поведения. Обязательным компонентом объектно-ориентированного конструирования являются механизмы создания конструктивного элемента и его обновления путем изменения данных каждого элемента. Запуск механизма обновления при изменении данных автоматически инициирует операцию его создания, а так как эти механизмы наследуются всеми конструктивными элементами от базового типа, обеспечивается совместимость структур данных для всего набора элементов. Конструктивные элементы включены в общий цикл обновления, таким образом, любое изменение данных приводит к автоматическому обновлению модели в соответствии с правилами построения и данными

для каждого элемента.

Конструирование на основе использования параметрической модели комплексного представителя типовой детали

В этом случае геометрические параметры модели могут быть связаны как переменные и можно задать зависимости других размеров от этих переменных в виде формул. Реализация геометрической модели осуществляется в среде CAD модуля путём последовательного использования языка высокого уровня (например, VBA или Си++) и табличного процессора Excel.

Каждая группа деталей имеет свои особенности конструкции, определяющие выбор метода создания объемной модели. Несмотря на это, можно перечислить основные этапы работы, общие во все варианты:

-анализ конструкции деталей группы (рисунок 6.8);

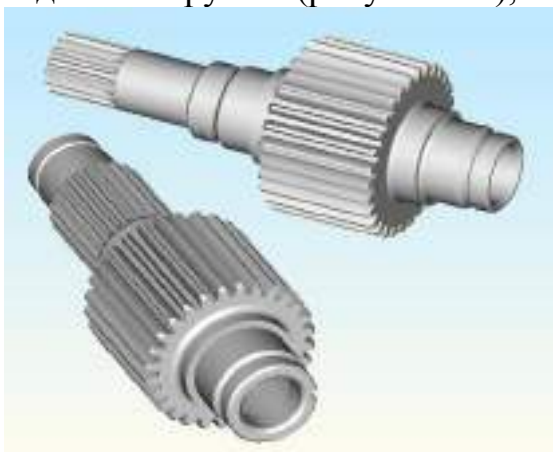


Рисунок 6.8 - Анализ конструкции деталей группы

-формирование комплексного представителя группы деталей;

-построение исходных контуров для создания объемной модели;

-проставка размеров (координация поверхностей) (рисунок 6.9);

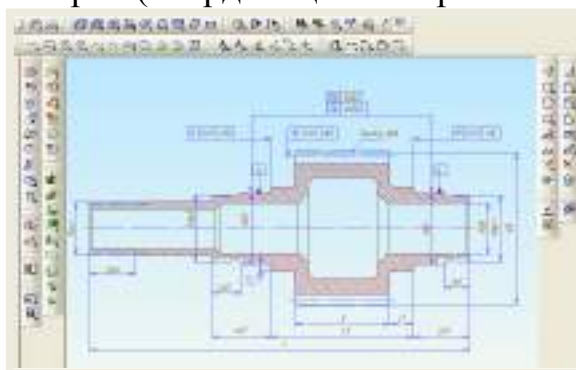


Рисунок 6.9 - Проставка размеров

-преобразование размеров в параметрические;

-построение объемной модели с помощью выполнения операций над контурами (рисунок 6.10);

-создание электронной табличной формы для внесения информации из конструкторского чертежа детали (рисунок 6.11);

-написание алгоритма расчета параметрических размеров с использованием данных с чертежа, оформление таблицы расчета;

-подключение таблицы значений параметрических размеров к параметрической модели, запись параметрического фрагмента.

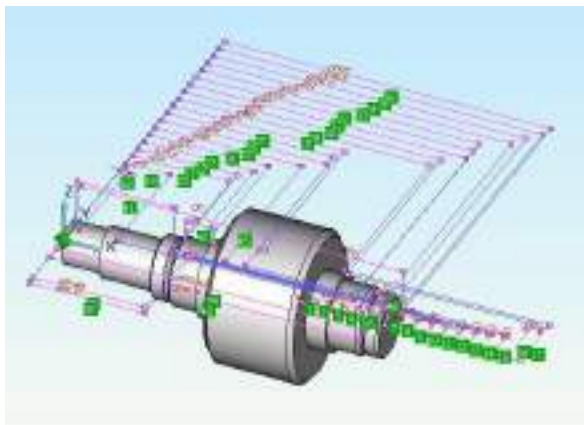


Рисунок 6.10 - Параметрическая объёмная модель комплексного представителя

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Зубчатый венец			Диаметр вала под подшипники		* - в зависимости от серии				
2		<i>m</i>	<i>z</i>	<i>b</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>h</i>	<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>Lo1</i>	<i>Lp1</i>
3	деталь №1	3	30	66	45	45	3	15	95	36	16
4	деталь №2	6	20	65	50	50	4	15	105	38	18
5	деталь №3	3	28	77	55	55	4	8	95	38,5	12,5
6	деталь №4	3	30	60	45	45	4	15	90	37	18
7	деталь №5	4,5	25	38	40	40	3	10	85	28	16
8	деталь №6	3,5	50	45	45	45	4	12	80	25	15
9	деталь №7	5	20	65	50	50	5	10	92	32	18

Лекция 18. Автоматизация технологической подготовки производства

Технологическая подготовка производства

Этап технологической подготовки производства тесно связан с предыдущими этапами, так как входной информацией служат данные геометрической модели изделия. В процессе работы технолог будет неоднократно обращаться к предыдущим этапам для проектирования моделей инструмента, оснастки или модификации модели изделия совместно с конструктором.

Практика показывает, что предприятия подходят к созданию своих интегрированных информационных систем, предназначенных для комплексного решения задач автоматизации конструирования, инженерного анализа и технологической подготовки производства, по-разному. Во многих случаях на рабочих местах конструкторов и технологов устанавливаются программные среды различных фирм-разработчиков. В этих условиях вопросы организации обмена информацией становятся актуальными. Известно, что обмен без потерь информации достигается при наличии единой базы данных для различных подсистем. Этим выгодно отличаются комплексные системы сквозного проектирования и подготовки производства верхнего уровня. В тех случаях, когда на рабочих местах устанавливаются программные среды различных фирм, организация обмена информацией между ними ложится на самих пользователей. Поэтому важно, чтобы для этих программ были разработаны соответствующие интерфейсы с необходимой полнотой реализации форматов.

Назначение этапа технологической подготовки производства в основном сводится к решению следующих задач (рис. 7.1):

- разработка технологий изготовления изделия, инструментов, приспособлений и т.д. на основе их геометрических моделей, полученных на этапе проектирования;
- подготовка программ для станков с ЧПУ по спроектированным технологиям.

Программные среды, с помощью которых решаются указанные задачи, можно разделить на две группы. К первой из них следует отнести программные комплексы, специально разработанные для выполнения всего цикла или отдельных процедур технологической подготовки производства. Среди этой группы программного обеспечения можно выделить: ADEM, ArtCAM, EdgeCAM и некоторые разработки российских фирм: КОМПАС АВТОПРОЕКТ (Аскон) – проектирование технологических процессов механообработки, штамповки, сборки, термообработки; FLEX ТехноПро (Топ Системы) – проектирование технологии механообработки, сборки, сварки, пайки, нанесения покрытий, штамповки,ковки, термообработки; СИТЕП МО (Станкин СОФТ) – механообработка, СИТЕП ЛШ – листовая штамповка; TECHCARD (Интермех) – комплексная система автоматизации технологической подготовки производства; ТехноПро (Вектор) – универсальная система автоматизации технологического проектирования; SprutCAM, СПРУТ-ТП (СПРУТ-Технологии) – система автоматизированного проектирования технологических процессов.

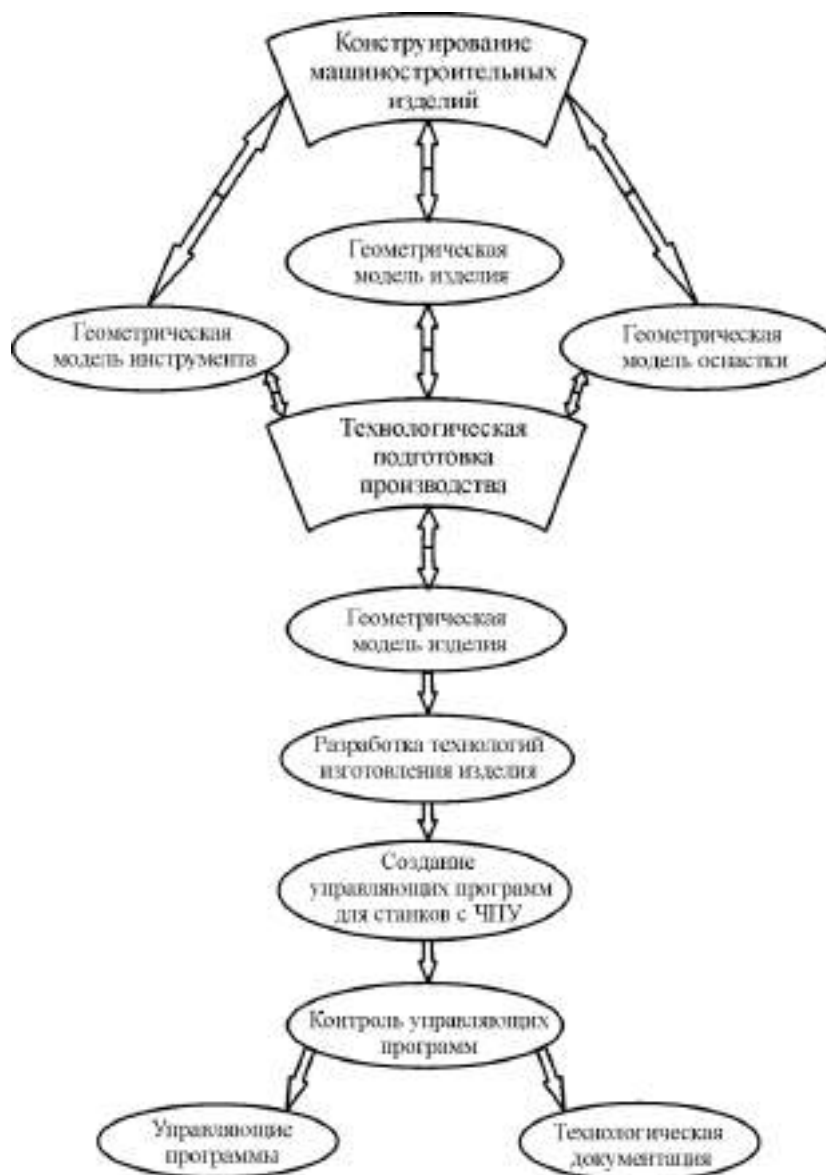


Рис. 7.1. Обобщенная структурная схема технологической подготовки производства

Другую группу программного обеспечения составляют программные системы сквозного проектирования и технологической подготовки производства: CATIA5, EUCLID3, Unigraphics, Pro/ENGINEER, CADD5. Контроль качества управляющих программ выполняют специальные программы, например, NC Simul, NC Formater.

В производстве машиностроительных и части приборостроительных изделий используются технологии, в основе которых лежат различные физические процессы: механообработка, электроэрозионная обработка, литье металлов и пластмасс и др. В автоматизированных системах сквозного проектирования и подготовки производства наиболее часто реализованы следующие виды механообработки: 2,5-, 3- и 5-координатное фрезерование, токарная обработка, сверление, нарезание резьбы. Имеется возможность моделировать движение инструмента и снятие материала во время черновой и чистовой обработки поверхности заготовки. Например, в

простейшем варианте 2- и 2,5-координатной обработки во многих программных комплексах реализованы следующие способы обработки поверхностей: контурная обработка, фрезерование призм и тел вращения, выборка карманов с возможностью движения «в одну сторону», зигзаг, спираль, а также нарезание резьбы и снятие фасок. В модулях 3- и 5-координатного фрезерования программных систем сквозного проектирования и технологической подготовки производства реализованы практически все возможные способы обработки различных поверхностей изделий, например, фрезерование поверхности с управлением угла наклона инструмента, шлифующее резание с возможностью обдувки и др.

При выполнении различных видов механообработки используется общая база данных для поддержки связи между геометрической моделью обрабатываемой детали и управляющей программой для станка с ЧПУ, где проходы инструмента создаются по геометрии модели. Изменение геометрии отражается в управляющей программе. Траектория движения инструмента создается интерактивно по поверхности модели изделия, благодаря чему технологи получают возможность визуально наблюдать на экране монитора имитацию процесса удаления стружки, контролировать подрезы и быстро вносить изменения в циклы обработки. С помощью специальных функций автоматически вычисляется объем материала, который необходимо удалить из заготовки при обработке.

Проектирование технологии фрезерной обработки

В системах сквозного проектирования и технологической подготовки производства различных фирм-разработчиков реализованы свои подходы к организации программ, свои алгоритмы и методы. Для более предметного изложения этой темы обратимся к основным этапам работы технолога в системах верхнего уровня на примере системы EUCLID3 фирмы EADS MATRA DATAVISION (Франция), которая воплотила многолетний опыт специалистов различных отраслей и считается одной из лучших в мире.

Приведем некоторые основные понятия, используемые в проектировании технологических процессов.

Удаляемый материал. Материал, удаляемый из заготовки детали в каком-либо цикле ее обработки, определяется геометрическим объектом, тип которого зависит от вида механической обработки. Таким геометрическим объектом может быть элемент одного из следующих типов:

- незамкнутая линия (например, для сверления);
- замкнутая линия или контур (например, для контурной обработки);
- призма (например, для обработки выемок);

- тело вращения.

Удаляемый материал может состоять из нескольких частей, соответствующих последовательности переходов обработки. Удаляемый материал в виде объема восстанавливается из истории создания обрабатываемой детали. Контуры (возможно, перфорированные) обрабатываются как отверстия или острова.

Система базирования элементов оборудования. Одним из важных понятий в проектировании технологий является понятие системы базирования элементов оборудования. В системе EUCLID3 это понятие ассоциируется с понятием trihedral. Системы базирования отвечают за взаимное расположение всех элементов оборудования: станка, инструмента, инструментальной оснастки, технологической оснастки (приспособления) и заготовки в процессе обработки. Система базирования элемента создается путем определения положений начала координат и направления осей X , Y , Z . При этом на экране монитора указываются только оси Z и X . Ось Y не отображается, так как ее положение всегда можно вычислить по правилу правой руки. В процессе описания того или иного элемента оборудования технолог самостоятельно определяет положение системы базирования. Назначение ее для того или иного элемента оборудования будем называть определением данного элемента. На всех приведенных далее рисунках в системах базирования ось Z будет изображаться сплошной линией, ось X – пунктирной. Система базирования существует как самостоятельный объект, имена этим объектам технолог назначает произвольно.

Среда обработки. В подсистеме проектирования процессов механообработки предварительно создается так называемая среда обработки. Элементами этой среды являются:

- описание имеющихся на предприятии фрезерных станков с ЧПУ;
- геометрически точные модели используемых инструментов;
- геометрически точные модели элементов установки инструмента (конусов, державок) в шпинделе станка;
- модели элементов установки заготовки на столе фрезерного станка;
- модель заготовки;
- модель конечной детали.

В среду обработки следует ввести сведения о материале, из которого будет изготавливаться конечная деталь. Система предоставляет выбор материала детали из списка возможных материалов.

Базу данных технологического оборудования, имеющегося на предприятии, необходимо создать до начала работы с подсистемой технологической подготовки производства. Создание макетов станков, моделей приспособлений и инструмента ведется методами твердотельного или поверхностного моделирования, которые описаны ранее в параграфах 6.1 и 6.3. При разработке моделей оборудования и инструмента следует

учитывать, что геометрическое моделирование позволяет повысить качество контроля управляющих программ.

Однако для проектирования процессов механообработки подробная геометрически точная модель всего станка не нужна. Достаточно определить кинематическую схему станка. Поэтому далее используется понятие

«макет станка», содержание которого определяется при описании оборудования конкретного способа механообработки. На этапе макетирования некоторых видов оснастки можно использовать условное или «виртуальное» приспособление. Этот прием позволяет получить предварительный вариант управляющей программы, выполнить контроль резцов детали и столкновений элементов станка, в результате которого можно определить оптимальную установку заготовки, подобрать инструмент, а затем спроектировать нужное приспособление. После получения окончательного варианта управляющей программы с реальными элементами оснастки и инструментом у технолога появляется возможность проконтролировать работу этой программы с имитацией всех реальных условий процесса обработки.

Макеты станков, приспособлений и инструмента также могут использоваться для анимации процесса фрезерования и удаления материала во время обработки.

Описание станка в базе данных содержит следующую информацию:

- название станка;
- описание архитектуры (компоновки);
- технологические параметры станка;
- геометрические параметры;
- описание кинематической схемы.

Описание архитектуры станка определяет возможные движения элементов станка в процессе его работы (в отечественной литературе более употребительным будет термин «компоновка станка»). В архитектуре указывается, какие элементы станка двигаются или вращаются соответственно вдоль или вокруг определенных осей и как они связаны друг с другом. Архитектура станка определяется выражением типа «Оси заготовки/Оси инструмента», где «Оси заготовки» представляют оси координат станка, по которым движется обрабатываемая заготовка относительно станины станка, а «Оси инструмента» – оси координат станка, по которым движется инструмент относительно станины станка.

Для описания архитектуры станка нужно определить оси линейных перемещений элементов станка относительно его станины X , Y , Z . Дополнительные оси A , B и C описывают вращения подвижных элементов станка (стол или шпиндельная головка), вокруг осей X , Y и Z соответственно. Оси A , B и C обычно записываются в начале и в конце символического описания архитектуры станка. Например, запись CXY/ZB идентифицирует 5- координатный станок, поворотный стол которого

может вращаться вокруг оси Z и перемещаться вдоль осей X и Y , а инструмент перемещается вдоль оси Z и вращается вокруг оси Y .

Выбор станка можно выполнить одним из следующих способов:

- вызвать из базы данных оригинальный, созданный ранее станок;
- выбрать тип станка по образцу.

База данных содержит наиболее широко используемые станки со следующей архитектурой:

XY/ZV , X/YZ_H , BX/YZ_H , CBX/YZ_V , $X/YZCA\_V$, CYX/ZB_V .

Выбранный по образцу станок создается «фиктивно»: без связанного геометрического представления и ограничений. Он также имеет технологические параметры по умолчанию.

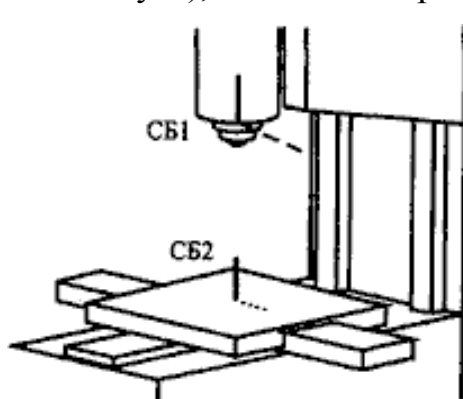
Технологические параметры – это максимальные обороты шпинделя, максимальные скорости подачи, наличие охлаждения и т.д. Геометрические параметры используются для условного или реалистичного представления станка. Эти параметры необязательны, можно дать определение станка без создания его геометрической модели. Однако более детальное представление станка позволяет точно контролировать столкновения элементов станка при движении инструмента по траектории.

Кинематическая схема определяет связь обрабатываемой заготовки с элементами технологической оснастки, станком, элементами инструментальной оснастки и инструментом. Кинематическая схема возникает в результате нескольких операций определения:

- станка;
- элементов инструментальной оснастки;
- инструмента;
- заготовки;
- элементов технологической оснастки.

Определение станка заключается в назначении системы базирования шпинделя СБ1 и системы базирования положения технологической оснастки на его столе СБ2 (рис. 7.2).

Определение элементов инструментальной оснастки состоит в указании систем базирования шпинделя и инструмента. Инструментальная оснастка может быть простой, т. е. состоять из одного элемента (например, из конуса), и комбинированной, состоящей из нескольких элементов



(например, из переходника и конуса). В последнем случае каждому элементу оснастки определяется по две системы базирования.

На рис. 7.3 в качестве примера показаны системы базирования элементов комбинированной инструментальной оснастки: конуса (СБ3 и СБ4) и переходника (СБ5 и СБ6), где СБ3 – система базирования шпинделя, которая

будет совмещаться с СБ1, СБ4

Рис. 7.2. Определение станка

– система базирования переходника, СБ5 – система базирования конуса, СБ6 – система базирования инструмента, которая в дальнейшем будет совмещаться с системой базирования державки инструмента. При сборке этих элементов переходник присоединяется к конусу так, что СБ4 совпадает с СБ5 (рис. 7.4).

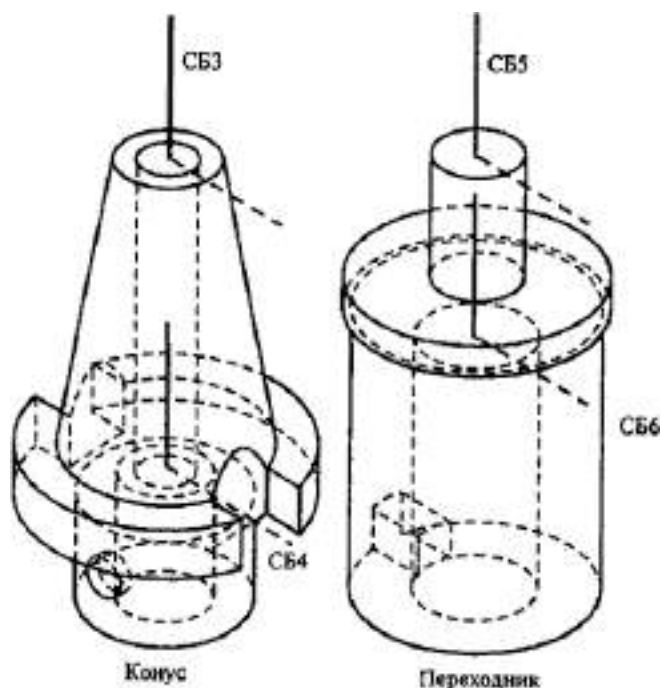


Рис. 7.3. Определение элементов инструментальной оснастки

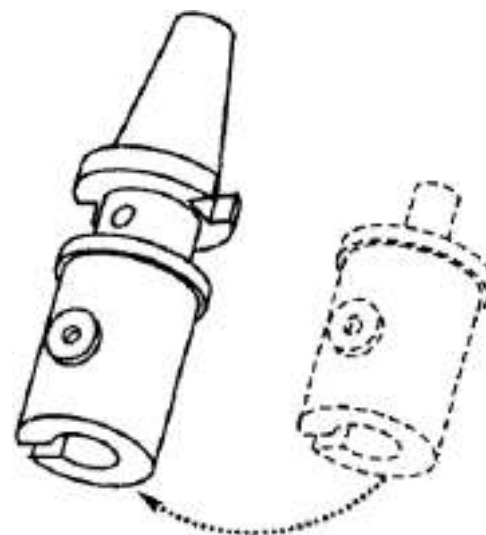


Рис. 7.4. Сборка элементов инструментальной оснастки

Определение инструмента есть продолжение описания кинематической схемы фрезерного станка и содержит следующую информацию:

- геометрическое описание, условное или реалистичное представление инструмента, служащее моделью реального инструмента;
- система базирования державки (конуса), которая фиксирует инструмент в шпинделе;
- система базирования фрезы, которая определяет положение инструмента относительно обрабатываемой заготовки; параметры инструмента, соответствующие типу инструмента.

При создании процесса обработки можно установить инструмент непосредственно в шпиндель станка либо предварительно создать сборку инструмента с одним (или более) элементом инструментальной оснастки и затем установить эту сборку в шпиндель станка.

При определении инструмента необходимо выбрать систему базирования державки инструмента СБ7 и систему базирования фрезы СБ8 (рис. 7.5). Указание СБ7 необходимо для совмещения инструмента с соответствующей системой базирования элемента оснастки. Например, если в качестве такой оснастки используется комбинированная оснастка,

изображенная на рис. 7.3, то при сборке ее с инструментом система СБ6 будет совмещаться с СБ7 (рис. 7.6).

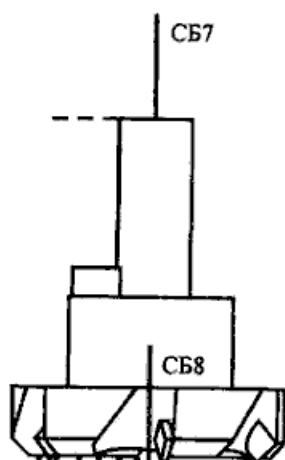


Рис. 7.5. Определение инструмента

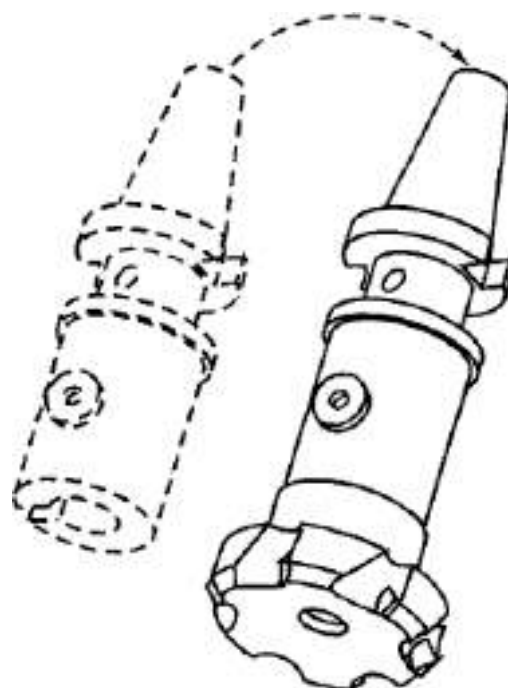


Рис. 7.6. Сборка инструмента с инструментальной оснасткой

База данных инструментов содержит следующие типы инструмента: метчик, развертку, сверло, центровочное сверло, коническую фрезу, коническую зенковку, цилиндрическую зенковку, торцевую фрезу, концевую фрезу, концевую обдирочную фрезу, инструмент для гравировки, резцы, нестандартный и фасонный инструмент.

Для каждого типа инструмента определяются его параметры. Например, метчик будет описан следующими параметрами: диаметром метчика, шагом резьбы, длиной режущей части, его полной длиной и геометрической моделью метчика. Концевая фреза описывается следующими параметрами: диаметром фрезы, длиной режущих поверхностей по оси фрезы, глубиной резания, радиусом торца фрезы, максимальной глубиной обработки, полной длиной фрезы, количеством зубьев и геометрической моделью фрезы.

Для автоматического расчета режимов резания в процессе обработки учитываются свойства материала и параметры инструмента. В системе есть возможность создавать цепочки ассоциированных объектов «инструмент (тип и параметры) – материал – режим обработки». Можно выбрать другой материал и связать другой набор параметров с тем же типом инструмента. Инструмент с заданным режимом резания и заданным материалом как ассоциированный объект сохраняется в базе данных.

Формировать цепочки ассоциированных объектов «инструмент – материал – режим обработки» необходимо следующим образом:

- выбрать созданный ранее инструмент;
- выбрать обрабатываемый материал: графит, латунь, золото, серебро, воск, пластик, дерево, алюминий, литой чугун, сталь и др.;
- ввести параметры режима резания:
 - единицы, в которых выражается скорость резания: число оборотов в минуту, единицы длины в минуту;
 - скорость резания;
 - направление вращения шпинделя (по ходу или против хода часовой стрелки);
 - единицы, в которых выражается скорость подвода: единицы в минуту, единицы на оборот инструмента, единицы на режущую кромку, ускоренная подача;
 - скорость, с которой инструмент подводится к обрабатываемой заготовке;
 - единицы, в которых выражается скорость подачи: единицы в минуту, единицы на оборот инструмента, единицы на режущую кромку, скорость рабочей подачи;
 - единицы, в которых выражается скорость отвода инструмента: единицы в минуту, единицы на оборот инструмента, единицы на режущую кромку, ускоренная подача;
 - скорость отвода инструмента;
 - перекрытие проходов, которое выражается в процентах от диаметра инструмента;
 - глубина резания;
- сохранение цепочки ассоциированных объектов «инструмент – материал – режим обработки» в базе данных.

База данных инструментов содержит огромное количество данных, последовательный просмотр которых может занять много времени. В системе есть возможность ограничить объем предъявляемых данных путем ввода определенных признаков. Для инструментов такими признаками могут быть: тип инструмента, материал заготовки и параметры инструмента.

Определение заготовки содержит выбор системы базирования заготовки, которая позволяет однозначно зафиксировать заготовку относительно технологического приспособления. Система базирования заготовки СБ13 показана на рис. 7.7.

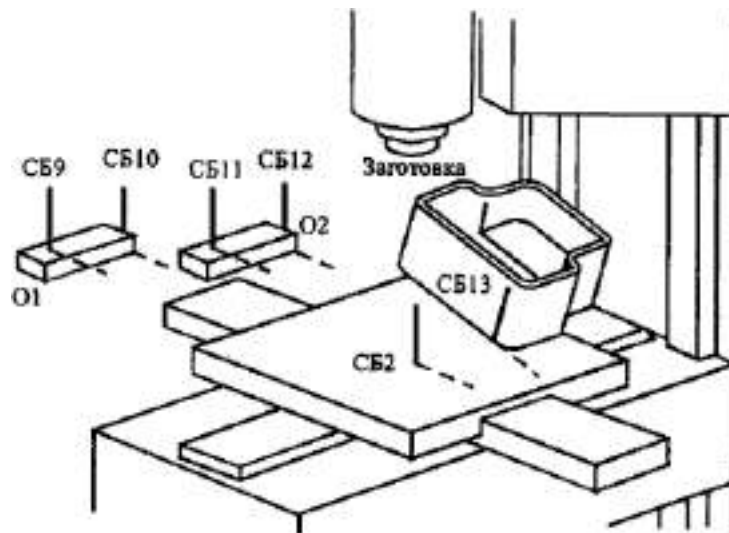


Рис. 7.7. Определение элементов технологической оснастки и заготовки

Определение элементов технологической оснастки заключается в назначении каждому элементу технологической оснастки его систем базирования. Элементы установки детали (крепежного приспособления) позволяют зафиксировать заготовку на столе станка. С каждым элементом установки детали связаны две системы базирования: стола, которая определяет положение приспособления на столе, и заготовки детали, которая указывает положение заготовки относительно приспособления. Определение всех элементов технологической оснастки на станке дает возможность точно проконтролировать столкновения при имитации процесса фрезерования.

Можно использовать более одного элемента крепежного приспособления. На рис. 7.7 условно изображены два элемента технологической оснастки:

- элемент O1 и его системы базирования:
 - СБ9 – система базирования заготовки,
 - СБ10 – система базирования элемента O2;
- элемент O2 и его системы базирования:
 - СБ11 – система базирования элемента O1,
 - СБ12 – система базирования стола.

Определение всех составляющих кинематической схемы позволит системе технологического проектирования собрать воедино все составляющие оборудования в момент создания процесса (рис. 7.8), а именно:

- монтировать инструмент с элементами инструментальной оснастки;
- автоматически закрепить элементы инструментальной оснастки в шпинделе станка;
- автоматически установить технологическую оснастку (СБ10 + СБ11);

- автоматически установить заготовку в технологическую оснастку (СБ9 + СБ13);
- автоматически установить технологическую оснастку в исходную позицию обработки заготовки (СБ12 + СБ2).

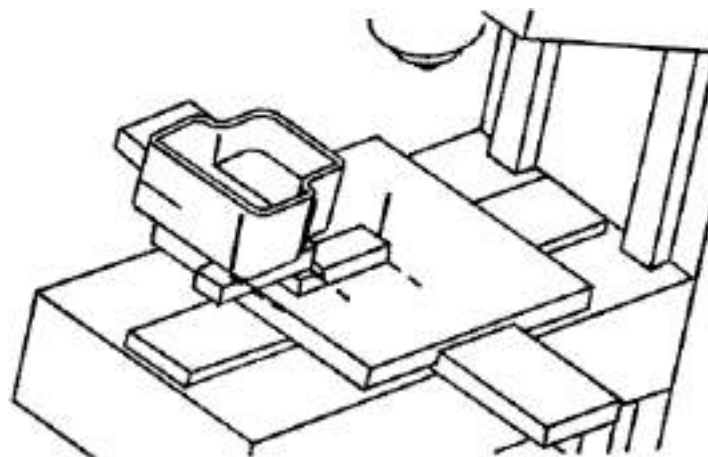


Рис. 7.8. Кинематическая схема оборудования

Проектирование технологии токарной обработки

Специализированная подсистема «Токарная обработка» – одна из подсистем комплекса EUCLID3, с помощью которой выполняется подготовка управляющих программ для токарных станков с ЧПУ.

Проектирование технологии токарной обработки базируется на тех же подходах, что и проектирование фрезерной обработки. У этих подсистем общая база данных и одни и те же этапы проектирования, но содержательная часть этих этапов у них разная. Чтобы не дублировать изложенную в разделе 7.2 методику построения процесса, остановимся только на характерных особенностях токарной обработки.

Рассмотрим основные понятия, используемые в проектировании технологического процесса токарной обработки.

Удаляемый материал. Это часть заготовки, удаляемая при обработке установленным инструментом в заданном цикле токарной обработки. Для таких циклов, как сверление и контурное точение, удаляемым материалом могут быть:

- незамкнутая линия, соответствующая траектории режущего инструмента;
- призма (например, для обработки выемок, используя точение по оси С);
- отверстие.

Кроме точения по оси С, удаляемый материал должен быть представлен плоскими гранями в плоскости обработки, определяемой осями Х и Z. Для многопроходной обточки по контуру удаляемый материал определяется контуром, который состоит из обрабатываемого контура заготовки и обрабатываемого контура детали. Если существуют объемные

модели заготовки и детали, то удаляемый материал выделяется из контуров их образующих (рис. 7.9).

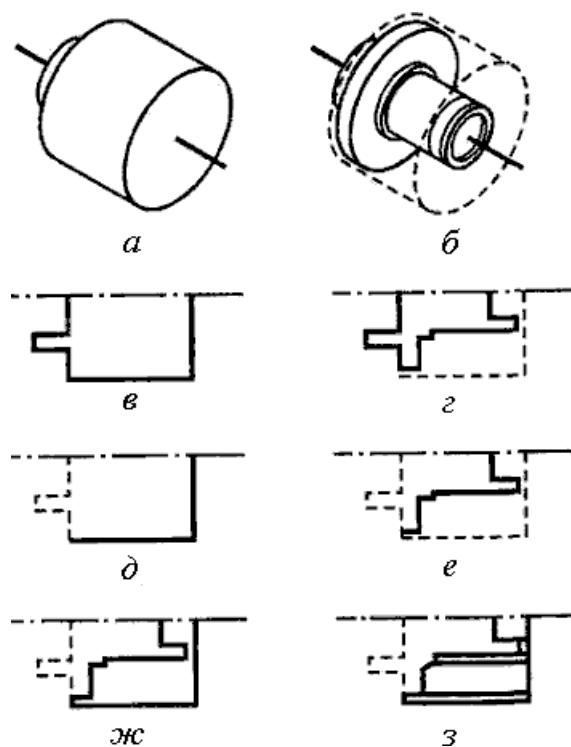


Рис. 7.9. Определение удаляемого материала по контурам заготовки и детали: *а* – заготовка; *б* – деталь; *в*, *г* – образующие соответственно заготовки и детали; *д*, *е* – обрабатываемые контуры соответственно заготовки и детали; *ж* – контур удаляемого материала; *з* – вариант разбиения удаляемого материала

Система базирования элементов оборудования. Системы базирования отвечают за взаимное расположение всех элементов оборудования: токарного станка, инструмента, инструментальной оснастки, технологической оснастки (приспособления) и детали в процессе обработки. Система базирования элемента создается описанным во фрезерной обработке методом, определяющим положение начала координат элемента и направления его осей X , Y , Z .

Среда токарной обработки. Эта среда включает:

- описание имеющихся на предприятии токарных станков с ЧПУ;
- геометрические модели используемых инструментов;
- геометрические модели элементов инструментальной оснастки (резцедержатели, переходные патроны);
- модели элементов технологической оснастки токарного станка;
- модель заготовки;
- модель конечной детали.

Необходимо также указать сведения о материале, из которого будет изготавливаться деталь.

Базу данных технологического оборудования, имеющегося на предприятии, следует создать до начала работы с подсистемой

технологической подготовки производства. Если геометрические модели станка и инструмента не были построены заранее, в процессе создания макетов оборудования автоматически будет создано точное их представление, достаточное для контроля обработки. Геометрические модели оригинальных элементов оборудования предприятия повышают качество технологического процесса и контроля управляющих программ.

Макеты токарных станков должны быть обязательно протестированы после создания, а сборка макетов и моделей всего оборудования необходима для анимации процесса токарной обработки.

Описание станка в базе данных содержит следующую информацию:

- название токарного станка;
- описание архитектуры;
- технологические параметры;
- геометрические параметры;
- описание кинематической схемы.

Архитектура токарного станка. Описание архитектуры станка определяет направления перемещения детали и инструмента станка X, Z, C, а также положения упоров (рис. 7.10).

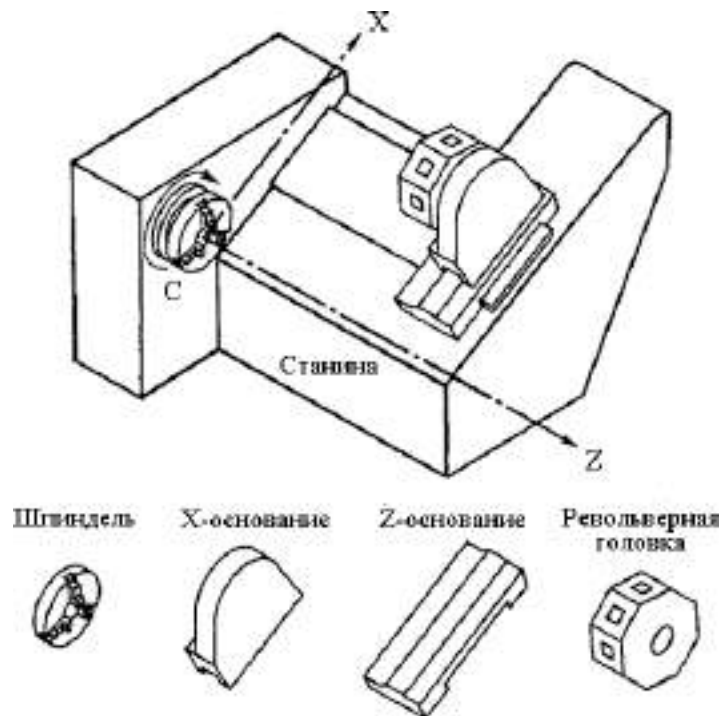


Рис. 7.10. Схема токарного станка

Описание токарного станка можно вызвать из базы данных ранее созданных станков.

Технологические параметры токарного станка. Существуют следующие технологические характеристики токарных станков:

- время на смену инструмента (с);
- максимальное число оборотов шпинделя в минуту (об/мин);
- максимальная подача (перемещение заготовки) в текущих единицах

(мм или дюймы) в минуту (мм/мин);

- максимальная скорость перемещения вдоль осей X, Z в текущих единицах (мм или дюймы) в минуту (мм/мин);
- максимальное число оборотов в минуту вокруг оси C (об/мин);
- возможность подачи охлаждающей жидкости.

Технолог может описать тип станка и кинематические параметры револьверной головки дополнительными параметрами, такими, как количество устанавливаемых в револьверную головку инструментов, угол поворота револьверной головки при смене инструмента и др.

Геометрические параметры станка. Геометрические параметры используются для условного или геометрического представления токарного станка. Если геометрические элементы для представления различных частей станка не созданы заранее и не присутствуют в базе данных, то система создаст схематичное представление нового станка. Для этого необ-

ходимо определить неподвижную часть (станину) и подвижные части станка:

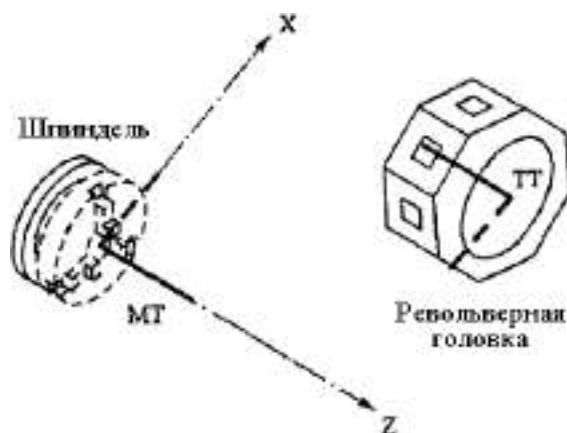
- шпиндель;
- часть станка (стол), перемещающуюся вдоль оси Z (оси вращения шпинделя);
- часть станка (стол), перемещающуюся вдоль оси X.

Кинематическая схема токарного станка. Кинематика токарного станка определяет положение плоскости обработки, упоров, револьверной головки и возможность C-координатной обработки. Для создания кинематической схемы станка необходимо иметь ранее построенные и сохраненные в базе данных все элементы оборудования. Напомним, что они обеспечат более точный контроль.

Кинематическая схема является результатом нескольких операций определения:

- токарного станка;
- элементов инструментальной оснастки;
- инструмента;
- элементов технологической оснастки.

При определении токарного станка задаются положение и ориентация двух элементов: револьверной головки и шпинделя станка



(рис. 7.11).

Рис. 7.11. Системы базирования токарного станка

Система базирования станка включает:

- систему базирования шпинделя (MT) (рис 7.12), определяющую:
 - начало координат станка,
 - ось вращения шпинделя – направление оси Z станка,
 - направление оси X станка,
 - плоскость XOZ станка – плоскость обработки;
- систему базирования револьверной головки (TT) (рис. 7.13), определяющую ее положение и направление оси ее вращения Z . Направление вращения револьверной головки по ходу часовой стрелки определяется, глядя в направлении вектора оси Z системы базирования головки;
- системы базирования инструмента (TT1 – TT8).

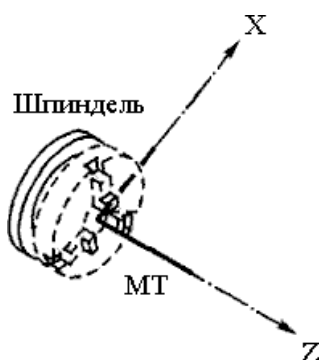


Рис. 7.12. Система базирования шпинделя токарного станка

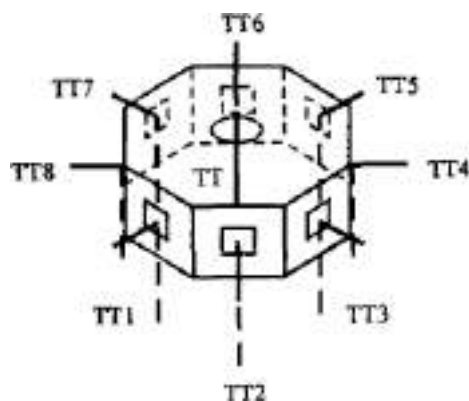


Рис. 7.13. Системы базирования револьверной головки и инструмента

Чтобы обеспечить безопасную работу токарного станка, вводятся предельно допустимые положения одной или нескольких револьверных головок. Эти значения задаются в виде координат ближнего и дальнего упоров на оси шпинделя (упоры по Z) и координат ближнего и дальнего упоров на оси X (упоры по X) (рис. 7.14). Для этого на револьверной головке можно создать дополнительные системы базирования.

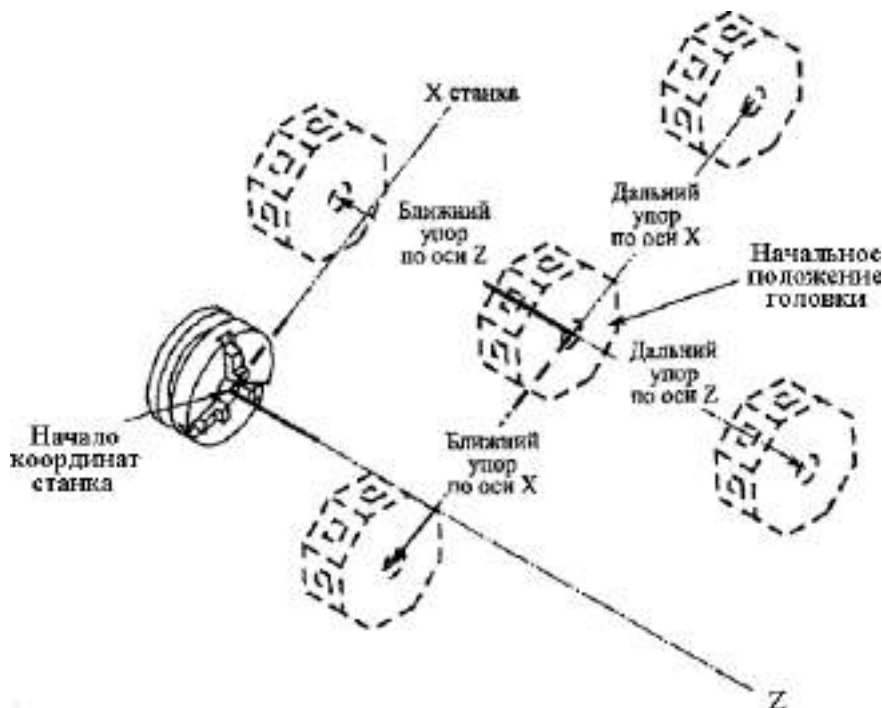


Рис. 7.14. Схема определения положения упоров

Для проверки заданных параметров и настроек в завершении процедуры создания макета токарного станка необходимо выполнить его тестирование. Оно заключается в имитации движений частей станка в плоскости обработки, вокруг и вдоль заданных осей станка, а также в положениях дальних и ближних упоров.

Определение инструментальной оснастки состоит в указании системы базирования револьверной головки и инструмента на геометрических моделях элементов оснастки. Комбинированная инструментальная оснастка может состоять из нескольких элементов (переходников, удлинителей и т.п.). В этом случае следует создать все необходимые системы базирования этих элементов, которые обеспечат их сборку на станке. Пример комбинированной инструментальной оснастки приведен на рис. 7.15.

Переходной элемент 2 имеет две системы базирования:

- револьверной головки (TUR2);
- элемента 1 (TOOL2).

Промежуточный элемент 1 (удлинитель), в свою очередь, тоже имеет две системы базирования:

- элемента 2 (TUR1);
- инструмента (TOOL1).

При сборке данной комбинированной оснастки системы базирования ее элементов TOOL2 и TUR1 будут совмещены. В единой кинематической схеме токарного станка система базирования элемента инструментальной оснастки TUR2 будет совмещаться с соответствующей системой базирования инструмента ТТ1 – ТТ8, а TOOL1 будет совмещаться с системой базирования державки инструмента.

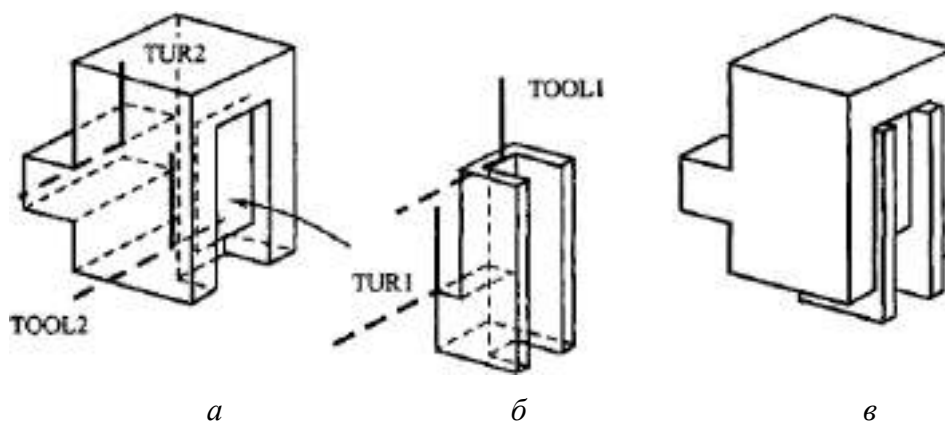


Рис. 7.15. Определение комбинированной инструментальной оснастки и ее сборки: *а* – элемент 2; *б* – элемент 1; *в* – инструментальная оснастка в сборе

Определение инструмента будет продолжением описания кинематической схемы токарного станка и содержит следующую информацию:

- геометрическое описание, условное или реалистичное представление инструмента, являющееся моделью реального токарного резца;
- систему базирования державки, с помощью которой резец фиксируется в инструментальной оснастке;
- систему базирования резца, которая определяет положение режущей кромки резца относительно обрабатываемой заготовки;
- параметры соответствующего типа резца.

Если геометрическая модель оригинального токарного резца не создана заранее в подсистеме твердотельного моделирования и отсутствует в базе данных предприятия, то условное представление типового резца будет создано автоматически (вызвано из стандартной базы данных). При проектировании процесса обработки можно установить инструмент непосредственно в револьверную головку токарного станка либо предварительно создать сборку инструмента с одним или более элементом инструментальной оснастки и затем установить эту сборку в револьверную головку токарного станка.

На рис. 1.16 приведен пример токарного резца и его систем базирования. Система базирования державки НТ при сборке с элементом 1 инструментальной оснастки совместится с системой базирования TOOL1 (рис. 7.17). Система базирования резца позволит точно

рассчитать траекторию движения резца в процессе обработки.

База данных токарного инструмента содержит следующие типы резцов, нестандартного и фасонного инструмента: метчик, развертка, сверло, резец резьбовой, резец гравировальный, резец проходной с продольным и поперечным перемещениями.

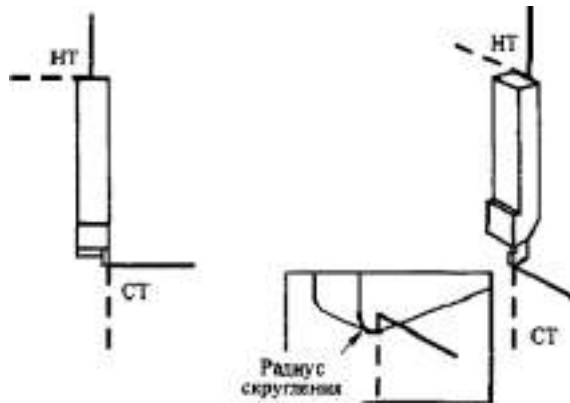


Рис. 7.16. Системы базирования токарного резца: CT – система базирования резца; HT – система базирования державки инструмента

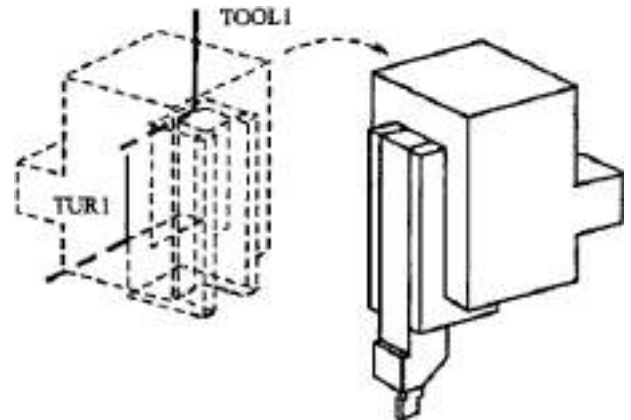


Рис. 7.17. Сборка резца с комбинированной инструментальной оснасткой

Для каждого типа инструмента определяют его параметры:

- форма режущей кромки (рис. 7.18), определяемая незамкнутой линией (ломаной и (или) дугой);
- глубина резания в одном или двух направлениях, определяемая отрезком или ломаной из двух отрезков (границы обработки) (рис. 7.19);
- направление обработки, определяемое двумя точками, или первое направление в случае нескольких направлений обработки;
- второе (возможное) и третье (возможное) направления обработки, определяемые двумя точками (рис. 7.20);
- максимальная глубина обработки.

Свойства материала используются вместе с параметрами инструмента для автоматического расчета режима резания в процессе обработки. При обработке резцами, так же, как и при фрезерной обработке, можно документировать все свойства резцов и других инструментов в цепочках ассоциированных объектов «инструмент (тип и параметры) – материал – режим обработки», а затем выбирать их из базы данных по определенным признакам.

Определение элементов технологической оснастки заключается в назначении каждому элементу технологической оснастки его систем



Рис. 7.18. Параметры рабочей части резца

базирования. Элементы установки обрабатываемой заготовки (крепежного приспособления) закрепляют заготовку в шпинделе токарного станка. С каждым элементом установки заготовки связаны две системы базирования: шпинделя, которая определяет положение приспособления, и заготовки детали, которая указывает положение заготовки относительно приспособления. Определение всех элементов технологической оснастки на станке позволяет точно проконтролировать возможные столкновения при имитации процесса обработки.

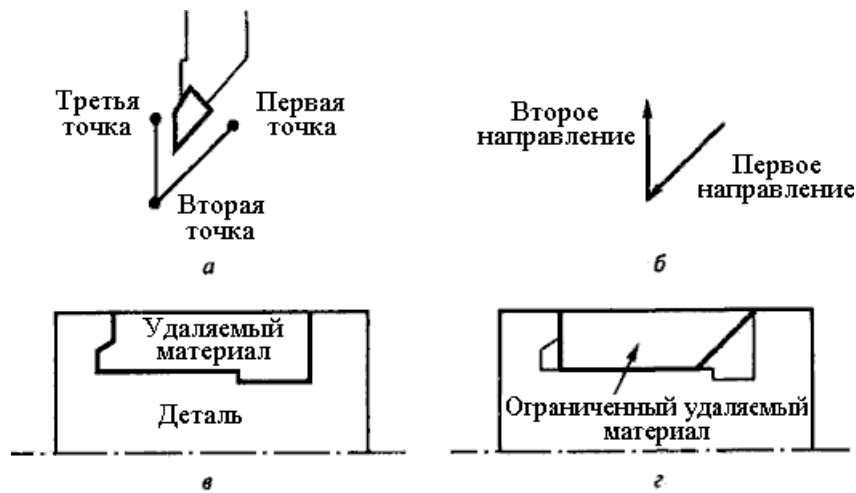


Рис. 7.19. Определение границ обработки тремя точками: *а* – указание трех точек; *б* – полученные два направления обработки; *в* – исходный удаляемый материал; *г* – получаемый после обработки удаляемый материал

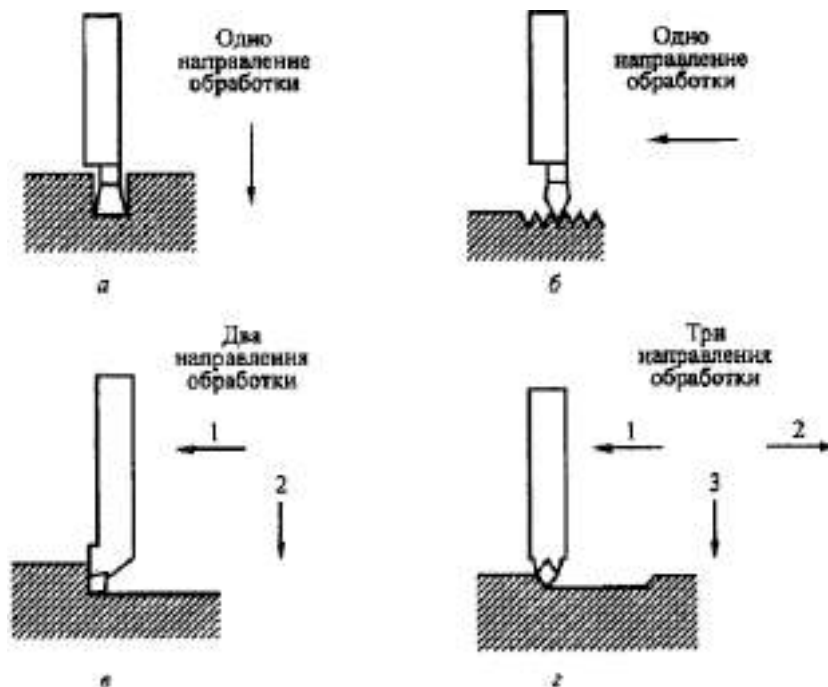


Рис. 7.20. Определение направлений обработки: гравировальным (*а*), резьбовым (*б*), проходным (*в*) резцами и резцом для контурного точения (*г*)

Технологическая оснастка, так же, как и инструментальная, может быть сложной и состоять из нескольких крепежных элементов, каждому

из которых необходимо создать пару систем базирования. Пример такой комбинированной технологической оснастки приведен на рис. 7.21. Системы базирования элементов технологической оснастки рассмотрим ниже.

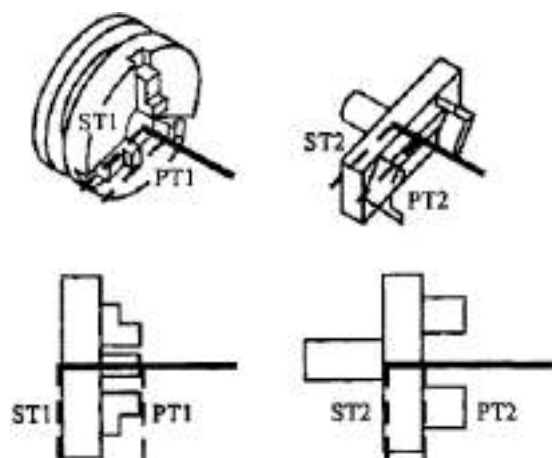


Рис. 7.21. Системы базирования элементов технологической оснастки

Система базирования крепежного приспособления 1 включает в себя системы базирования:

- шпинделя (ST1), которая при сборке должна совместиться с системой базирования станка (MT);
- крепежного приспособления 2 (PT1).

Система базирования крепежного приспособления 2 включает в себя системы базирования:

- крепежного приспособления 1 (ST2),
- заготовки детали (PT2).

При сборке данной комбинированной технологической оснастки системы базирования ее крепежных приспособлений 2 и 1 (PT1 и ST2) будут совмещены. В единой кинематической схеме токарного станка система базирования крепежного приспособления 1 (ST1) будет совмещаться с системой базирования шпинделя станка MT, а PT2 будет совмещаться с системой базирования заготовки.

Определение всех составляющих кинематической схемы позволяет собрать воедино все составляющие оборудования:

- монтировать инструмент с элементами инструментальной оснастки;
- автоматически закреплять элементы оснастки инструмента в револьверной головке или на суппорте в начале последовательности операций;
- автоматически устанавливать смонтированный инструмент в головку или на суппорт в начале операции;
- автоматически устанавливать станок в исходную позицию (первую точку) обработки детали в начале цикла.

Лекция 19. Алгоритм работы в САМ-системе

Несмотря на то что сегодня существует не один десяток САМ-систем и все они отличаются интерфейсом и возможностями, порядок работы с ними примерно одинаков.

Выбор геометрии

Самым первым действием технолога-программиста является выбор геометрических элементов, подлежащих обработке. Такие геометрические элементы называются рабочими, или обрабатываемыми. Это могут быть точки, линии, поверхности, грани и ребра 3D-моделей.

Современные САМ-системы позволяют контролировать перемещение инструмента не только относительно рабочих элементов, но и относительно других геометрических элементов. Можно выбрать контролируемые элементы, которых инструмент не должен касаться ни при каких условиях.

Некоторые САМ-системы требуют определения геометрии заготовки уже на начальном этапе проектирования обработки. Это означает, что система «видит» заготовку и рассчитывает траектории, исходя из действительного припуска. Заготовка может быть определена несколькими способами:

- в виде цилиндра;
- в виде параллелепипеда (куба);
- произвольной формы.

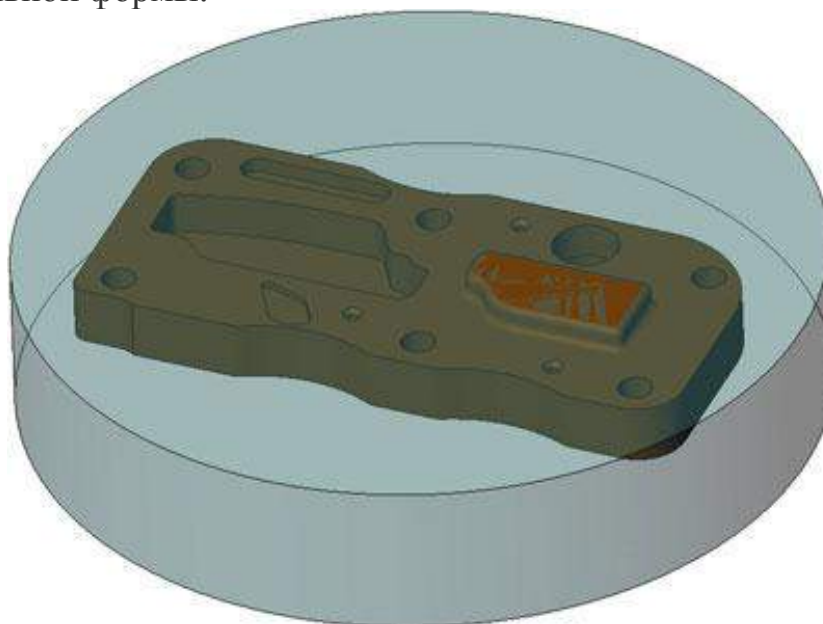


Рис. 12.11. Цилиндрическая заготовка

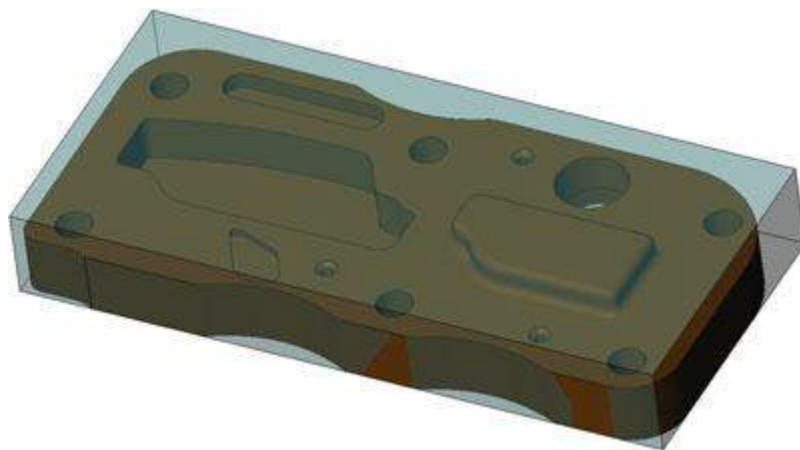


Рис. 12.12. Заготовка в виде параллелепипеда

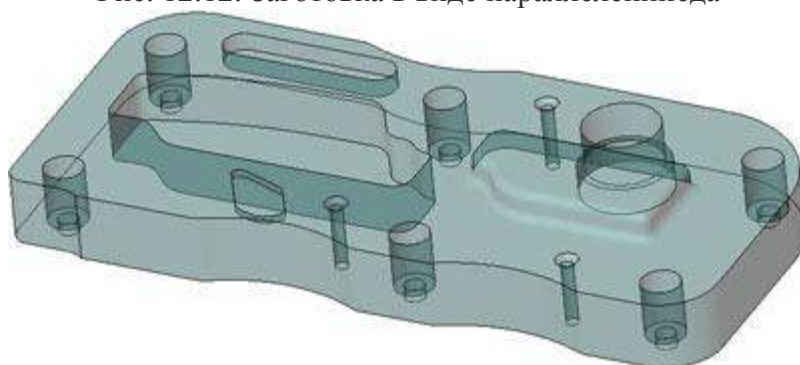


Рис. 12.13. Для построения заготовок сложных форм, имитирующих отливки и поковки, САМ-система может создавать модели заготовок, смещая внешние границы 3D-модели детали на указанное расстояние. Большинство современных САД/САМ-систем позволяют импортировать 3D-модель заготовки, которая была создана в другой или в этой же системе

Существуют системы, которые не требуют определения геометрии заготовки на этом этапе. Заготовка назначается и используется только на этапе верификации и не участвует в процессе расчета траекторий. Такое решение является недостаточно эффективным, так как при расчетах система всегда исходит из заготовки правильной формы – параллелепипеда или цилиндра. Если же на самом деле заготовка имеет неправильную форму, то система может сформировать довольно много холостых ходов.

Выбирая геометрические элементы, подлежащие обработке, технолог-программист должен учитывать положение детали и заготовки относительно нулевой точки. Здесь есть два пути. Во-первых, можно сместить 3D-модель детали относительно нулевой точки таким образом, чтобы выбранный элемент совпал с ней. Во-вторых, можно смещать нулевую точку относительно модели, «привязывая» ее к определенному геометрическому элементу. Однако это не означает, что первоначальный выбор нулевой точки является окончательным. Система позволяет изменять любые параметры, в том числе и положение нулевой точки детали, в любой момент и на любом этапе проектирования обработки.

Выбор стратегии и инструмента, назначение параметров обработки

На втором этапе работы с САМ-системой технолог-программист выбирает стратегию и параметры обработки, назначает инструмент и режимы резания. Современная система обычно имеет солидный набор стратегий и позволяет выполнить обработку одной и той же детали разными способами.

Условно все стратегии можно разделить на черновые и чистовые, стратегии плоской и объемной обработки. Рассмотрим стратегии, характерные для большинства современных САМ-систем.

Плоская обработка

Стратегии плоской обработки применяются при работе с 2D-геометрией. В этом случае не требуется большого разнообразия – вся обработка сводится к фрезерованию контура или плоскости, выборке кармана и обработке отверстий (рис. 12.14–12.17).

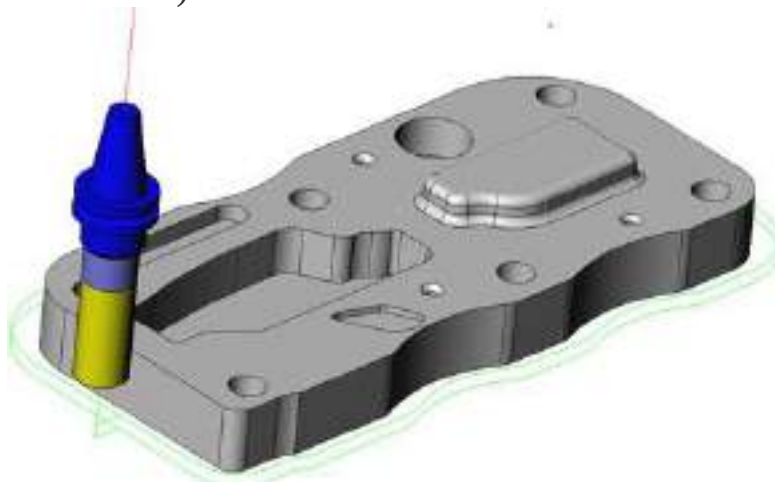


Рис. 12.14. Контурная стратегия (Contour). Для чернового фрезерования указываются количество проходов и шаг между ними (перекрытие)

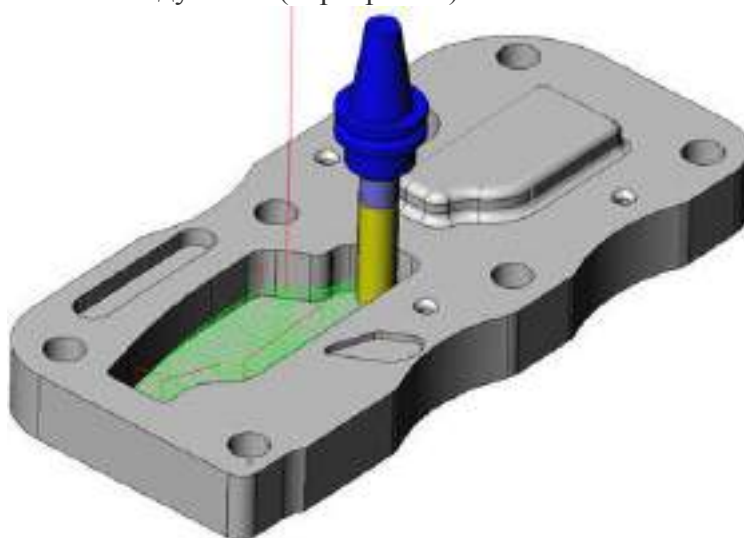


Рис. 12.15. Обработка кармана (Pocket). Эта стратегия предназначена для выборки замкнутых областей. Основными параметрами являются шаг между проходами фрезы и тип траектории (параллельная, спиральная, зигзаг и др.)



Рис. 12.16. Обработка торца (Face). Основными параметрами для этой стратегии являются шаг между проходами фрезы и угол обработки

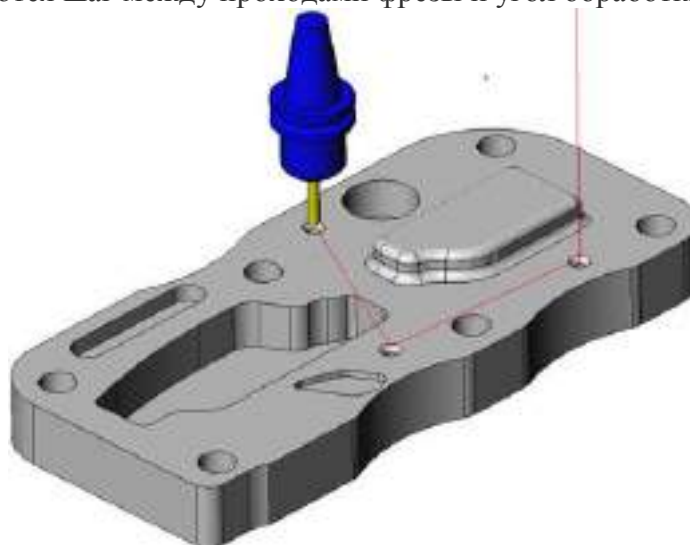


Рис. 12.17. Обработка отверстий: сверление (Drill), нарезание резьбы (Threading), растачивание (Boring). Основные параметры – тип операции и глубина обработки

Объемная обработка

Стратегии объемной обработки предназначены для работы с 3D-моделями. Эти стратегии отличаются большим разнообразием, однако все они условно могут быть разделены на черновые и чистовые.

Стратегии объемной черновой обработки предназначены для быстрой послойной выборки большого объема материала и подготовки детали к последующей чистовой обработке. Стратегии объемной чистовой обработки используются для окончательного фрезерования поверхностей с требуемым качеством. Зачастую при объемном чистовом фрезеровании управление перемещением режущего инструмента осуществляется одновременно минимум по трем координатам. Как правило, при объемной обработке используют сферические фрезы. В этом случае произвести расчет перемещения инструмента самостоятельно, без использования CAD/CAM-системы чрезвычайно трудно.

В качестве примеров рассмотрим некоторые стратегии объемной обработки более подробно.

Обработка кармана – стратегия, предназначенная для эффективного удаления материала из закрытых или открытых карманов. Существует множество схем карманной обработки: зигзаг, в одном направлении, параллельная и круговая спираль. Современная CAD/CAM-система выбирает оптимальную схему фрезерования, обеспечивая максимальную производительность и минимальное число холостых ходов. Как правило, эта стратегия заключается в последовательной послойной выборке материала и выполнении заключительного чистового обхода контура на окончательной глубине. При зигзагообразной схеме обработки кармана происходит изменение вида фрезерования – с встречного на попутное или наоборот.

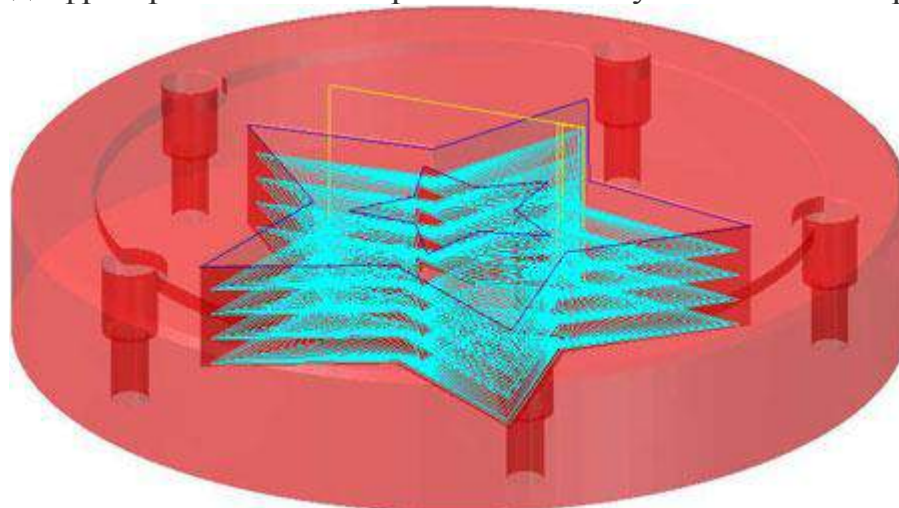


Рис. 12.18. Послойная обработка кармана

Стратегия радиальной обработки обычно применяется для черновой или чистовой обработки деталей круглой формы. Перемещение инструмента в этой стратегии производится от центра детали к ее внешним границам (или наоборот) с постепенным изменением угла в плоскости обработки.

С помощью черновой вертикальной выборки можно быстро обработать деталь, используя движения, аналогичные сверлению. Производства, использующие такую стратегию, приобретают специальные плунжерные фрезы, позволяющие быстро выбрать материал и имеющие подвод охлаждающей жидкости через ось инструмента. Стратегия черновой вертикальной выборки отлично подходит для обработки глубоких впадин и карманов.

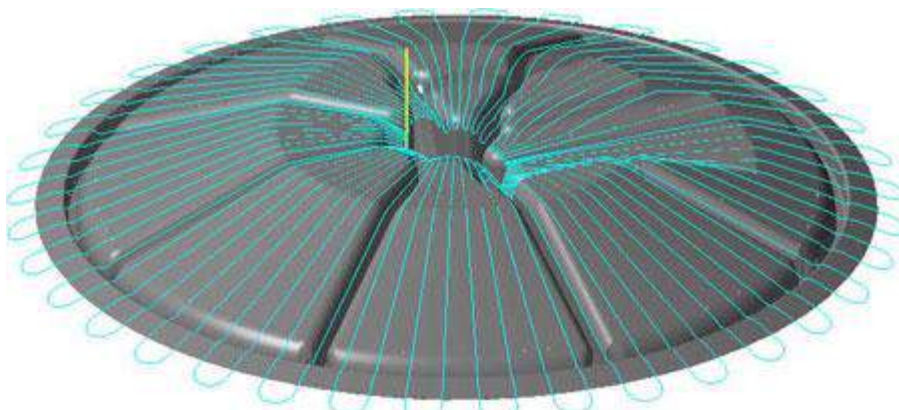


Рис. 12.19. Радиальная обработка

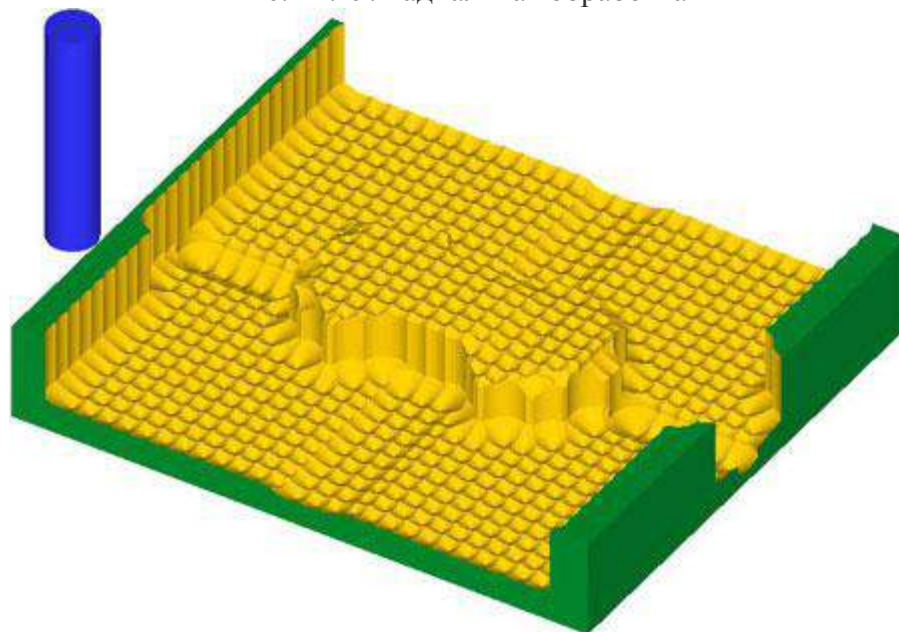


Рис. 12.20. Результат применения стратегии черновой вертикальной выборки

Стратегия фрезерования остатков (дообработка) позволяет автоматически удалить материал, оставшийся от предыдущей операции. Для увеличения производительности обработки принято выбирать материал сначала инструментом большого диаметра, а уже затем производить фрезерование в труднодоступных местах инструментом меньшего диаметра. Система, анализируя объем снятого и оставшегося материала, автоматически генерирует траекторию для выборки материала, который не был удален в предыдущей операции обработки.

Стратегия контурной обработки используется для черновой или чистовой контурной обработки деталей произвольной формы. Суть стратегии заключается в удалении припуска за счет проходов фрезы по контурам, созданным путем «смещения» границ текущего слоя по Z.

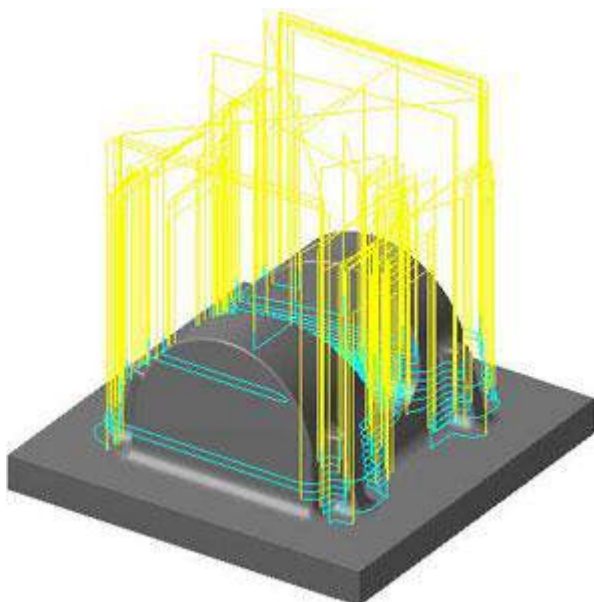


Рис. 12.21. Стратегия дообработки меньшим инструментом

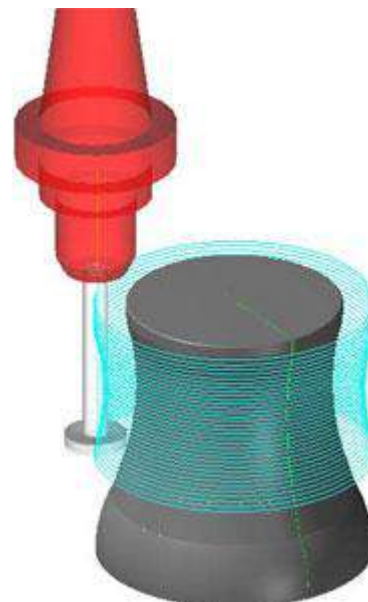


Рис. 12.22. Объемная контурная обработка

Стратегию обработки по потоковым линиям применяют для чистовой обработки любых поверхностей. Система создает траектории с учетом формы и направления поверхностей.

Стратегия проекционной обработки позволяет наложить на любой участок обрабатываемой поверхности своеобразный шаблон траектории движения инструмента или спроецировать плоскую траекторию на 3D-модель.

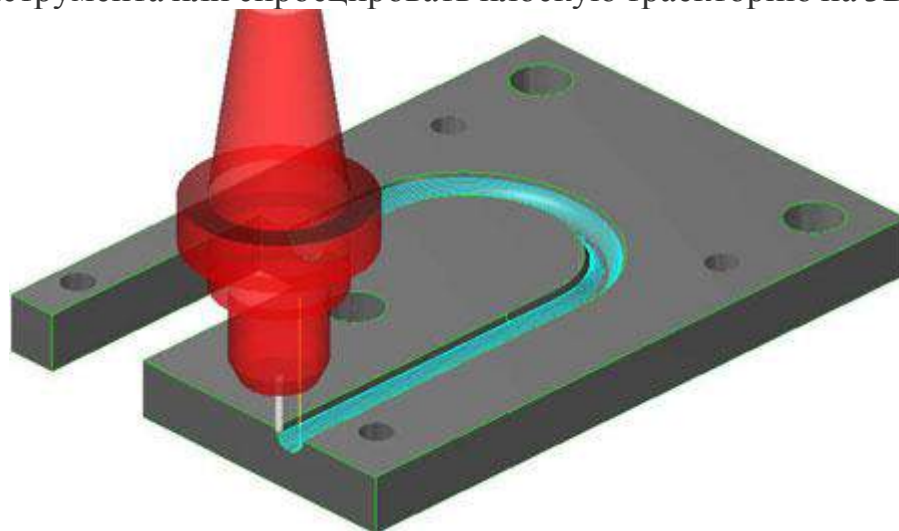


Рис. 12.23. Обработка по потоковым линиям, схема – зигзаг

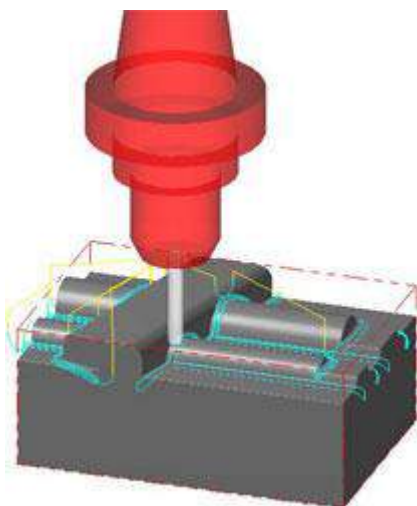


Рис. 12.24. Карандашная обработка

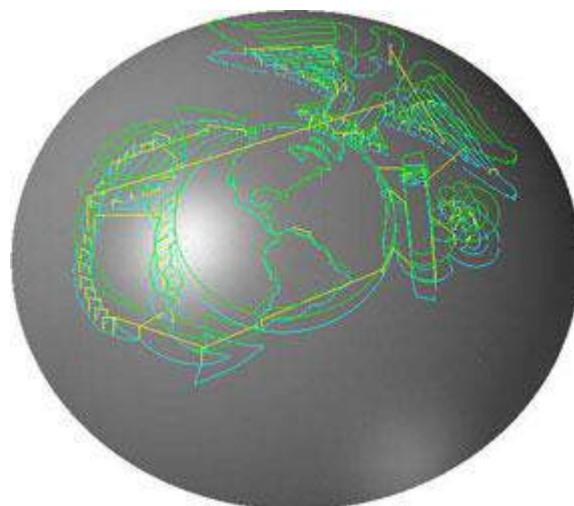


Рис. 12.25. Проецирование траектории на поверхность

После выбора стратегии и определения основных параметров обработки необходимо назначить режущий инструмент либо выбрать его из библиотеки инструментов. На этом же этапе определяются режимы резания: скорость рабочей подачи, обороты шпинделя – и программируется включение или выключение СОЖ. Результатом второго этапа является сформированная траектория. В дереве операций САМ-системы должна появиться новая технологическая операция.

Бэкплот и верификация

В настоящее время любая САМ-система имеет функции для проверки правильности созданных траекторий. Функция бэкплота (Backplot) позволяет программисту отслеживать перемещения режущего инструмента. При этом он может наблюдать за траекторией центра инструмента и самим инструментом прямо на 3D-модели. Как правило, бэкплот используется для предварительной проверки рассчитанных траекторий и настройки технологических параметров операции. Окончательная проверка обычно осуществляется с помощью верификации.

Инструменты верификации предоставляют программисту прекрасные возможности для наглядной проверки траектории движения инструмента, для оценки качества и общей технологии изготовления детали. Основным смыслом верификации заключается в демонстрации процесса удаления материала заготовки и возможности посмотреть на окончательный результат работы УП – модель изготовленной детали. Полученную «виртуальную» деталь можно рассмотреть с разных сторон. Можно увидеть, все ли элементы выполнены правильно, и даже разглядеть гребешки на материале, оставшиеся от инструмента.

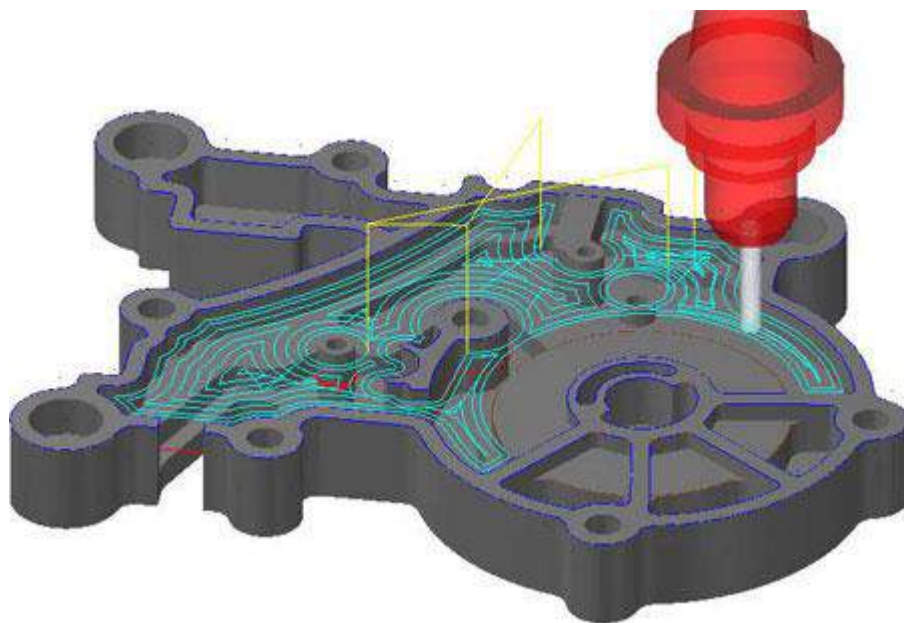


Рис. 12.26. В режиме «Backplot» можно наблюдать за траекторией перемещения центра инструмента

Верификация может быть твердотельной или растровой. В случае твердотельной верификации система работает с трехмерной моделью заготовки и позволяет реализовать множество полезных функций. К примеру, измерить обработанную деталь или экспортировать ее в CAD-систему для дальнейшей работы. Растровая верификация лишь имитирует работу с трехмерной моделью и применяется сейчас достаточно редко.

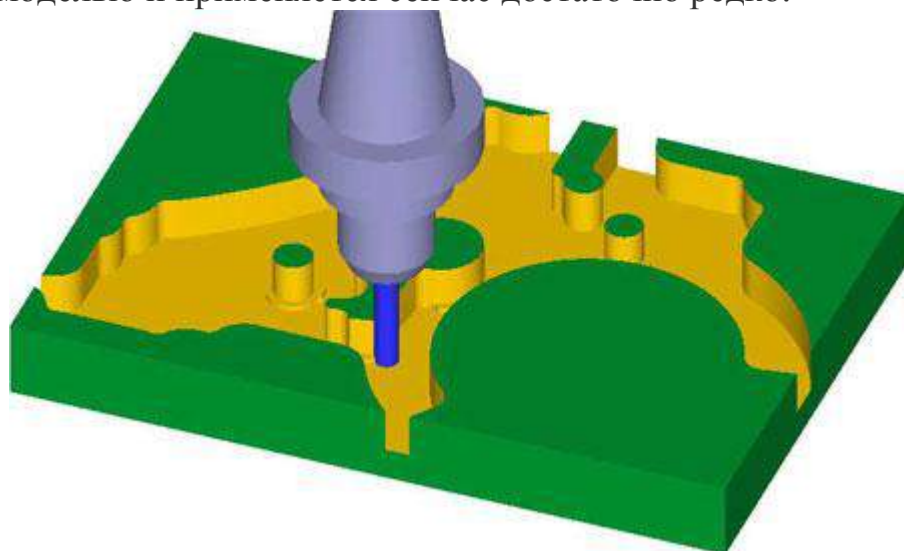


Рис. 12.27. Процесс верификации

Учтите, что на этом этапе мы еще не имеем готовой УП, то есть самого кода. Код программы обработки появится позже, после постпроцессирования. Но что же мы тогда проверяем?

Результатом предыдущего этапа является сформированная траектория перемещения инструмента для определенной операции. Информацию об этой траектории, всех координатах и инструменте система записывает в специальный промежуточный файл. Этот файл не похож на обычную программу обработки, то есть в нем нет привычных G- и M-кодов. В

настоящий момент именно этот файл является объектом для верификации и бэкплота.

Постпроцессирование

Постпроцессор – программа, которая преобразует файл траектории движения инструмента и технологических команд (промежуточный файл), сформированный CAD/CAM-системой, в файл УП в соответствии с требованиями конкретного комплекса станок – СЧПУ. В ряде отечественных систем постпроцессоры называются паспортами.

Для того чтобы абстрагироваться от большого разнообразия станков, систем ЧПУ и языков программирования обработки, САМ-система генерирует промежуточный файл, содержащий информацию о траектории, угле поворота инструмента (в случае многокоординатной обработки) и обобщенные команды управления станком. Обычно этот промежуточный файл называется CL-файлом (Cutter Location) или CLDATA-файлом.

Далее в работу вступает постпроцессор. Он преобразует этот промежуточный файл в программу обработки в строгом соответствии с форматом программирования конкретного станка с ЧПУ.

Такая технология позволяет программисту во время проектирования обработки в CAD/CAM-системе не задумываться о том, на какой конкретно станок попадет УП и каков будет ее формат. Ему необходимо лишь выбрать постпроцессор, соответствующий определенному станку с ЧПУ, и тот возьмет на себя всю работу по созданию программы обработки определенного формата.

Откуда же взялась идея постпроцессирования и почему до сих пор в этой области существуют проблемы? По идее, разработчики станков и систем ЧПУ должны соблюдать стандарты Ассоциации электронной промышленности (EIA) и Международной организации стандартизации (ISO). То есть, одинаковые G-коды на разных станках с ЧПУ должны выполнять одну и ту же функцию. В принципе, эти стандарты соблюдаются, но только для основных команд станка, например, для включения СОЖ, линейной и круговой интерполяции.

Если же дело доходит до других команд, постоянных циклов и специальных функций, то приверженность определенному стандарту практически отсутствует. Это приводит к невозможности правильного исполнения одной и той же УП на разных станках с ЧПУ. К этой проблеме прибавляется другая – постоянная «гонка» производителей оборудования с ЧПУ. В условиях жесткой конкуренции станкостроительные компании создают все более сложные станки, а разработчики систем ЧПУ придумывают новые циклы и функции. В результате серьезные отличия в формате УП могут быть замечены даже у станков одной фирмы, но разных моделей.



Рис. 12.28. Схема получения УП для конкретного комплекса «Станок – система ЧПУ»

Когда появились первые САМ-системы, то для работы с конкретным станком с ЧПУ разрабатывался индивидуальный постпроцессор, который представлял собой исполняемый файл. Индивидуальный постпроцессор мог быть создан только опытным программистом (именно программистом, а не технологом-программистом) путем длительного общения со станочником для выяснения всех нюансов работы с определенным станком. После этого проходили испытания и доводка индивидуального постпроцессора «до ума». В результате постпроцессор выполнял свои функции, но процесс его создания был очень долгим, мучительным и дорогим. Изменения в таком постпроцессоре мог сделать только сам авторразработчик.

В 70–80-х годах прошлого века наблюдался значительный подъем автоматизированного машиностроения. Как грибы после дождя стали появляться новые станки с различными системами ЧПУ. Возник огромный спрос на технологическое программное обеспечение и CAD/CAM-системы.

Программисты просто не успевали разрабатывать новые индивидуальные постпроцессоры, что подтолкнуло их к автоматизации собственного труда. Появилась идея создания обобщенных постпроцессоров для разных станков с одинаковой системой ЧПУ. В этом был смысл – при работе с системой ЧПУ одной фирмы даже на разных станках отличия в УП будут минимальными, значит, и изменения, которые нужно внести в исполняемый файл, тоже будут незначительными.

Классический постпроцессор, находящийся на службе современной CAD/CAM-системы, состоит из нескольких файлов. Во-первых, это исполняемый файл – программа. Исполняемый файл занимается преобразованием данных промежуточного CL-файла в кадры УП. Преобразование осуществляется по некоторым правилам, отличным для разных станков и систем ЧПУ. Эти правила, или алгоритмы преобразования, находятся во втором файле – текстовом.

Текстовый файл написан на специальном макроязыке, который может быть изменен в случае необходимости самим технологом-программистом в любом текстовом редакторе. Вносить какие-либо изменения в исполняемый файл не требуется. Как правило, с CAD/CAM-системой поставляется набор таких текстовых файлов, которые описывают правила для преобразования промежуточных файлов в программу обработки для нескольких десятков различных станков и систем ЧПУ. В данном случае постпроцессором можно

смело называть именно текстовый файл. Исполняемый же файл является модулем САМ-системы и работает незаметно для пользователя. В некоторых САМ-системах присутствует и третий файл, необходимый для постпроцессирования. Этот файл также является текстовым. Он предназначен для ввода дополнительных условий и передачи специальной информации в управляющую программу.

К сожалению, разработчики CAD/CAM-систем не придерживаются единого стандарта для формирования промежуточных CL-файлов. В результате текстовый файл с описанием алгоритмов преобразования (постпроцессор) одной САМ-системы будет абсолютно бесполезен для использования внутри другой САМ-системы. Для разработки даже такого текстового постпроцессора «с нуля» необходимы глубокие знания самой системы и принципов преобразования исходных данных. Поэтому пользователю предоставляют набор базовых постпроцессоров с редактируемыми переменными. Работая с этими переменными, пользователь может самостоятельно настроить постпроцессор для имеющегося станка.

Сегодня наиболее эффективным и простым решением проблем постпроцессирования на предприятии является использование универсального постпроцессора (генератора).

Универсальные постпроцессоры позволяют работать со многими известными CAD/CAM-системами и одновременно не зависеть от них. Дело в том, что, в отличие от классических постпроцессоров, которые работают с промежуточным файлом только «родной» системы, универсальные постпроцессоры способны «перерабатывать» CL-файлы разных САМ-систем. Прибавьте сюда продвинутый интуитивно-понятный графический интерфейс, позволяющий строить наглядную кинематическую схему станка и задавать типовые параметры системы ЧПУ, и вы получите мощное и универсальное средство для решения проблем совместимости любого оборудования с любой CAD/CAM-системой.

Как оценить результаты работы постпроцессора? Очень просто. Если полученная программа не требует ручной правки и доводки, значит, постпроцессор работает правильно. Это главный принцип. Хороший постпроцессор способен сформировать УП с учетом максимальных возможностей станка с ЧПУ и CAD/CAM-системы и должен грамотно работать с постоянными циклами. К примеру, если система ЧПУ станка поддерживает винтовую интерполяцию, то желательно, чтобы постпроцессор не заменял ее множеством линейных перемещений. Естественно, что программа обработки не должна содержать лишних кодов и координат.

Передача УП на станок с ЧПУ

Итак, программа обработки готова. После постпроцессирования CAD/CAM-система открывает файл УП в специальном редакторе или в

стандартном «Блокноте» операционной системы Windows. Многие системы поставляются со специальными редакторами УП, которые являются простым и удобным инструментом для правки и передачи программ на станок.

В большинстве случаев связь осуществляется в соответствии со стандартом RS-232. При этом COM-порт персонального компьютера соединяется кабелем со специальным разъемом на корпусе станка или панели УЧПУ. Для передачи данных необходимо, чтобы УЧПУ станка и коммуникационная программа были синхронизированы. Это достигается соответствующей настройкой параметров СЧПУ и коммуникационной программы. Например, если значение для стоповых битов (stop bits) системы ЧПУ станка равно двум, то такое же значение должно находиться и в соответствующем параметре коммуникационной программы.

После настройки основных параметров УП можно передать на станок. Вам придется переключить систему ЧПУ станка в режим приема/передачи данных, нажать на панели УЧПУ клавишу Прием данных, а в коммуникационной программе выбрать пункт меню Передать. Для передачи данных со станка на ПК нужно действовать наоборот. Сначала переключаем СЧПУ станка в режим приема/передачи данных, затем в коммуникационной программе выбираем пункт меню Принять и нажимаем клавишу на панели УЧПУ станка Передать данные. Внимательно читайте документацию к станку – в ней вы обязательно найдете информацию о настраиваемых параметрах для приема и передачи данных, а также последовательность действий при работе с внешними устройствами хранения информации.

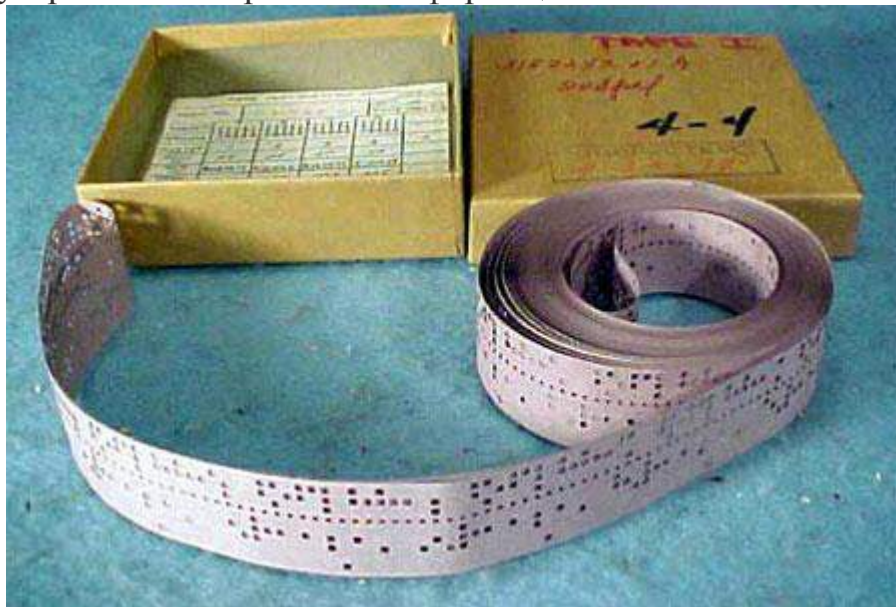


Рис. 12.29. На многих заводах до сих пор программы загружают в станок с ЧПУ при помощи перфоленты

Для передачи УП, размер которых превышает размер свободной памяти СЧПУ, используется режим DNC. В этом режиме программа обработки не записывается в память системы ЧПУ, а выполняется прямо с компьютера. Система ЧПУ имеет (или создает в памяти) специальный программный буфер, в который приходит часть программы. Как только этот буфер заполняется, система посылает сигнал на компьютер, чтобы тот прекратил передавать

данные. В это время СЧПУ станка выполняет кадры УП, находящиеся в буфере. Когда буфер освобождается, система ЧПУ посылает новый сигнал на ПК, который разрешает дальнейшую передачу данных. Этот процесс продолжается до полного выполнения УП. Для работы в режиме DNC необходимо, чтобы СЧПУ станка было соответствующим образом подготовлено производителем, а на персональном компьютере находилась коммуникационная программа с поддержкой этого режима.

Наиболее продвинутые системы дают возможность передавать данные по локальной сети, а не по RS-232. В этом случае пользователь прямо с ПК может «видеть» содержимое памяти станка. А прием и передача данных осуществляются привычным для Windows способом – перетаскиванием файлов из одной папки в другую, что очень удобно. Некоторые станки с ЧПУ снабжены встроенным дисководом или умеют читать информацию с флэш-карт.

Лекция 20. Аддитивные технологии. Аддитивное производство

«Аддитивные технологии» (Additive manufacturing), или AF-технологии (AF - от Additive Fabrication) - термин, которым в мировой практике обозначается применение 3D-печати в промышленности, что означает изготовление изделия путем добавления. Суть аддитивного производства — в сложении, а не вычитании, в таком способе создания детали сложной формы, когда материал наносится последовательно, как правило, слой за слоем, поэтому расходуется его столько, сколько необходимо, не больше и не меньше. Программное обеспечение 3D-принтера делит трехмерную компьютерную модель на слои одинаковой толщины, после чего принтер создаёт прототип, путём последовательного нанесения одного слоя модельного материала за другим.

3D-принтер — это устройство, работающее по принципу послойного формирования физического объекта из цифровой 3D-модели.

Процесс трехмерной печати еще называется быстрым прототипированием или аддитивным производством.

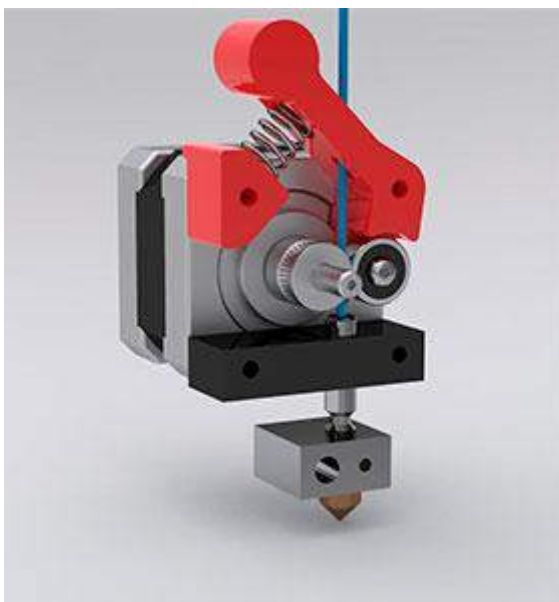


Настольный 3D-принтер

Технологии послойного формирования объектов называются аддитивные технологии от английского слова additive – добавлять. В отличие от традиционных способов получения деталей (фрезеровка, точение, распил и т.п.), на 3D-принтере детали получают методом добавления материала (слоев), что позволяет добиться высокой экономии материалов. 3D-печать может осуществляться разнообразными материалами (от пластика до металла), а также несколькими технологиями, подробнее о которых мы расскажем ниже.

Управление 3D-принтером осуществляется программным способом. Для того, чтобы принтер воспроизводил физический объект, просчет задания на печать должен происходить в специализированном программном обеспечении, в которое загружается цифровая модель в формате для 3D-печати (STL). Специальная программа слайсер разбивает цифровую 3D-модель на слои и выдает сформированный бинарный код понятный для 3D-принтера. Далее полученный код может быть запущен на печать в программном обеспечении для принтера или записан на карту памяти для непосредственной печати без ПК.

Способы позиционирования печатающей головки 3D-принтера



FDM экструдер

В зависимости от расположения и механики работы (кинематической модели) печатающего механизма, они подразделяются на следующие основные способы:

- Декартова, когда в конструкции используются три взаимно-перпендикулярные направляющие, вдоль каждой из которых движется либо печатающая головка, либо основание модели.
- Дельта-робот: три радиально-симметрично расположенных двигателя согласованно смещают основания трёх параллелограммов, прикреплённых к печатающей головке
- Автономная: когда печатающая головка размещена на собственном шасси, и эта конструкция передвигается целиком за счёт какого-либо двигателя, приводящего шасси в движение.

Сферы применения 3D-принтеров

- быстрое прототипирование
- мелкосерийное производство
- изготовление мастер-моделей и форм для литейного производства
- изготовление бытовых предметов
- производство готовых изделий со сложной геометрией и внутренней структурой
- макетирование
- реклама
- в медицине для изготовления протезов и имплантатов, также ведутся исследования по 3D-печати внутренних органов человека
- строительство зданий и сооружений
- производства корпусов экспериментальной техники (от телефонов до оружия)
- пищевое производство
- другое

Основные технологии 3D-печати

- Лазерная стереолитография (SLA)
- Полимеризация фотополимерного пластика ультрафиолетовой лампой (DLP)
- Выборочное лазерное спекание (SLS)
- Выборочное лазерное сплавление (SLM)
- Моделирование методом послойного наплавления (FDM)
- Электронно-лучевая плавка (EBM)
- Технология многоструйного моделирования (MJM)
- Технология цветной струйной печати (CJP)
- Ламинирование (LOM)
- Биопринтеры (экспериментальные)

Аддитивные технологии отличаются друг от друга выбором материалов и способа их нанесения, однако во всех случаях создание модели основывается на послойном наращивании. Предполагается, что готовая деталь не нуждается в традиционной механической обработке. Так что аддитивное производство — это еще один способ изготовления деталей и предметов из разных материалов наряду с литьем, прокатом, штамповкой и резкой.

Расходными материалами может послужить пластик, бетон, гипс, деревянное волокно, поликарбонат, металл и даже живые клетки и шоколад. Способов нанесения существует два:

- струйный;
- лазерный.

К струйному способу относятся такие технологии, как моделирование методом наплавления (Fused deposition modeling) и Polyjet.

К лазерному способу:

- послойное ламинирование (Laminated object manufacturing),
- селективное лазерное плавление (Selective laser melting),
- селективное лазерное спекание (Selective laser sintering),
- лазерная наплавка металла (Laser metal deposition);
- лазерная стереолитография (Laser stereolithography).

Считается, что аддитивные технологии впервые были разработаны и применены более 20 лет назад компанией Stratasys (США), которая и по сей день продолжает оставаться лидером в области 3D-печати и AF.

Мировыми лидерами в области аддитивных технологий являются Соединенные Штаты Америки, Германия, Китай, Япония. Кроме того, в 22 странах уже созданы национальные ассоциации по аддитивным технологиям, объединенные в альянс GARPA. Например, корпорация "Боинг" благодаря 3D-печати изготавливает более 22 тысяч деталей 300 наименований для 10 марок коммерческих и военных самолетов. Американское космическое ведомство NASA объявило об успешном испытании на огнеупорность инжектора ракетного двигателя, изготовленного с помощью селективного лазерного

плавления. Немецкий концерн Siemens заявил о переходе с традиционных методов производства деталей для горелок газовых турбин на технологию селективного лазерного плавления. В Китае прошли первые испытания истребителя с несущей конструкцией, напечатанной из порошка титана. А компания Southern Fan представила крупнейший в мире 3D-принтер (28 метров в длину, 23 метра в ширину и 9,5 метра в высоту), способный производить металлические компоненты с максимальным диаметром до 6 метров и весом до 300 тонн. Изделия планируется применять в ядерной, нефтехимической, металлургической отрасли. Компания Local Motors с помощью 3D-печати изготовила первый пригодный для поездок автомобиль под названием Strati. Этот двухместный электрокар официально представили публике в сентябре 2014 года в Чикаго. Strati состоит всего из 49 деталей, включая напечатанный на 3D-принтере корпус, в то время как типичный промышленный автомобиль имеет в своем составе несколько тысяч деталей. Печать автомобиля из термопластика, усиленного углеродными волокнами, с помощью лазерной системы заняла примерно 44 часа. Автомобиль способен разгоняться до скорости 40 миль в час и проезжать на одной зарядке до 120 миль.

В России используют и внедряют аддитивные технологии считанное количество промышленных компаний и исследовательских центров. За последние 15 лет в России был выдан 131 патент по различным аспектам аддитивного производства (0,14% от мирового количества), причем 14 из них получили российские заявители, а 117 — иностранные. Для сравнения: Южная Корея, США, Япония и Китай совместно владеют 90% патентов в этой сфере. В институте ВИАМ впервые в России изготовили по аддитивной технологии с применением отечественной металлопорошковой композиции так называемый завихритель - деталь перспективного авиационного двигателя. Цикл изготовления 60 изделий методом селективного лазерного сплавления составляет 5-6 дней, что в 10 раз меньше, чем при традиционной технологии литья, которая требует 59 дней! Аддитивным путем выращенный завихритель уже внесен в конструкторскую документацию и пошел в производство.

АФ-технологии имеют много преимуществ по сравнению с традиционными технологиями. Инновационные АФ позволяют вырастить “деталь в детали”, деталь - с переменными по толщине свойствами материала; сетчатые конструкции, которые не получить литьем или механообработкой. Используя бионические принципы, можно спроектировать и изготовить, например, эндопро-тез пустотелой кости. Один из существенных плюсов АФ - возможность моментальной передачи цифровых моделей в любую точку мира и организации в кратчайшие сроки локального производства в любых масштабах. При использовании АФ экономия сырья может достигать 75 процентов! Ведь технологический процесс выстроен не по принципу “беру камень и отсекаю от него лишнее” (Микеланджело), а наоборот: “не беру ничего лишнего” и выращиваю так, как творит природа тот или иной живой объект.

Далеко не все экономически целесообразно делать с помощью аддитивного производства, но есть очевидная ниша – это штучное и мелкосерийное производство уникальных деталей из дорогих материалов и в тех случаях, когда стоимость станочной обработки высока. На самом деле это очень большая ниша, начиная от ремонта и восстановления деталей сложных агрегатов и индивидуальных протезов до создания уникальных деталей сложной конфигурации.

Сегодня в России сформировалась задача по созданию новой отрасли промышленности – отрасли аддитивных технологий и определения направления ее развития. Во всех развитых странах происходит бум аддитивных технологий. Мировой рынок данных технологий с 2010 по 2014 год достиг более 3 млрд долларов, прирастая ежегодно более чем на 27%. В ближайшие 20 лет цифровое производство сменит некоторые виды массового, особенно с высокой конечной стоимостью продукции. Необходимо “оседлать эту тенденцию”, объединить усилия специалистов по созданию национальной концепции цифрового производства, в том числе программных кодов, технологического оборудования, а также единых подходов и стандартов, позволяющих обеспечить сквозной цикл проектирования и производства перспективной наукоемкой продукции [9]. Один из важнейших вопросов, который необходимо решать оперативно, – обеспечение новой отрасли кадрами.

На сегодняшний день рынок установок для аддитивного производства делится на три сегмента. Первый сегмент состоит из дешевых 3D-принтеров для офисов, ориентированных на изготовление концептуальных макетов. Второй сегмент – оборудование средней стоимости для создания прототипов деталей с различной степенью точности и/или функциональности. Дешевые и средние по стоимости установки обычно работают с полимерным материалом. Третий сегмент — установки высокого класса, которые стоят от двухсот тысяч до двух миллионов долларов. Они работают с полимерами, металлическими и керамическими порошками, с их помощью можно делать вполне крупногабаритные детали. Ведущие изготовители установок — американские компании 3D Systems и ExOne, израильская Stratasys, шведская Arcam, а также немецкие EOS и Voxeljet.

Аддитивное производство полного цикла, включает в себя разработку порошковых композиций, 3D-моделей, конструирование поддержек технологий синтеза (мощность лазера, стратегия лазерного сканирования, скорость и шаг сканирования). Сегодня в России закупают и используют порошки сплавов зарубежного производства, поставляемые фирмами – производителями установок. При этом имеется острая потребность в металлических порошках отечественных сплавов. Серийного производства порошковых материалов для данных технологий в России нет. Потребность существующего парка установок для аддитивного производства в РФ в порошковых материалах составляет примерно 20 тонн в год.

Изначально термина «3D-печать» не существовало, и инновационные технологии назывались «быстрое прототипирование». Создание прототипов

изделия является наиболее распространенным применением 3D-печати. Модели реальных размеров помогают оценить функциональность и исключить возможность различных ошибок перед серийным производством изделия.

Применение аддитивных технологий в различных отраслях машиностроения обеспечивает:

- изготовление сложнопрофильных и уникальных деталей без использования механических обрабатывающих станков и дорогостоящей оснастки;
- повышение рентабельности производства малой серии и эксклюзивных вариантов;
- устранение влияния "человеческого" фактора при изготовлении деталей: построение детали проводится в полностью автоматическом режиме;
- снижение веса деталей за счет уменьшения толщины стенок, элементов, создания сотовых и иных структур (т.н. бионического дизайна);
- возможность создания комплексных, интегрированных деталей за один технологический цикл;
- отсутствие в деталях литейных дефектов и напряжений;
- управление физико-механическими свойствами создаваемого изделия.

Быстрое прототипирование и 3D печать

Быстрое прототипирование (RP - Rapid Prototyping), сокр. БП — технология быстрого «макетирования», быстрого создания опытных образцов или работающей модели системы для демонстрации заказчику или проверки возможности реализации.

3D печать - это создание физических объектов на 3D принтере. Печать производится на основе цифровой 3D модели, по принципу послойного выращивания. Существуют различные технологии и материалы печати, но все они работают по общей схеме – слой за слоем создают объект

3d прототипирование широко используется в таких областях как:

- машиностроение
- электронная промышленность
- электротехническая промышленность
- медицина
- ювелирное дело
- архитектурное моделирование

С помощью технологий быстрого прототипирования изделий можно провести моделирование деталей любой сложности, прямо по данным из CAD программ. Сама 3D-печать занимает считанные часы. Это позволяет сократить время в проектировании готовых изделий.

Преимущества быстрого прототипирования

- Значительное повышение гибкости производства
- Быстрое и эффективное распространение дизайнерских идей
- Эффективную проверку соответствия, формы и функциональности конструкции
- Повышение конкурентоспособности производства
- Снижение себестоимости продукции, особенно для мелкосерийного производства
- Сокращение сроков выхода на рынок новой продукции
- Возможность проведения оперативных испытаний свойств изделий для разработки новых материалов и получения новых свойств продукции
- Интеграция компьютерных технологий и систем САПР

Технологии 3D печати

Основное различие технологий заключается в методах построения слоев. Лазерная стереолитография (Laser Stereolithography, SLA), Селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, SLS) и Моделирование методом наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM) самые распространенные технологии 3D печати. SLS и FDM используют плавление или размягчение материала для производства слоев.

Лазерная стереолитография (SLA) - объект формируется из специального жидкого фотополимера, затвердевающего под действием лазерного излучения (или излучения ртутных ламп).

Селективное лазерное спекание (SLS) - технология заключается в послойном спекании лазерным излучением порошкового материала.

Моделирование методом наплавления (FDM) - объект формируется путем послойной укладки расплавленной нити из плавкого рабочего материала (пластик, металл, воск). Рабочий материал слоями попадает на платформу, которая после завершения одного слоя, опускается для нанесения следующего.

Используемые материалы

Различные технологии прототипирования выбираются в зависимости от поставленной задачи и ее сложности, а, следовательно, и различные материалы для будущих моделей. Так как все проекты уникальны, то перед 3D-печатью необходимо проводить подробный анализ, и определить оптимальный по времени и стоимости способ выращивания модели.

- [ABS \(пластик\)](#) - подходит для большинства проектов. Самый распространённый материал, чтобы проверить будущий дизайн, оценить размеры, создать образец для презентации или для фокус группы. Можно печатать различными цветами - слоновая кость, белый, черный, красный, синий, зеленый, желтый, оранжевый, серый
- [Гипс \(керамика\)](#) - больше всего подходит для архитектурных проектов, дизайна интерьеров, макетов зданий, проектирования

районов. Так же используется для создания моделей для выставок и презентаций. Цветная 3D-печать позволяет делать наглядные модели, не требующие дальнейшей окраски.

- **Фотополимеры** - используется для точных размеров, проверки функционала, оценки механических свойств. Физические свойства фотополимеров известны заранее, поэтому можно подобрать свойства будущего изделия, и проводить испытания до начала



производства.

Пример использования стереолитографических моделей

Назначение БП

- Для оценки эргономики, визуализации, дизайна изделия
- Для функциональной оценки изделия (проверка качества сборочных изделий, аэродинамических характеристик, практичности)
- Использование в качестве модели для дальнейшего применения в производстве (в качестве литейной формы, электроэрозионного инструмента и др.)

Недостатки технологий БП

- Относительно высокая цена установок и расходных материалов.
- Невысокая точность
- Относительно низкая прочность моделей

С течением времени недостатки постепенно устраняются — снижаются цены, увеличивается выбор технологий и материалов.

Специальные области применения БП

- инженерный анализ
- визуализация потоков
- медицина

Лазерная стереолитография (SLA)

Наиболее точной аддитивной технологией считается стереолитография – метод поэтапного послойного отверждения жидкого фотополимера лазером. SLA принтеры используются преимущественно для изготовления прототипов, макетов и дизайнерских компонентов повышенной точности с высоким



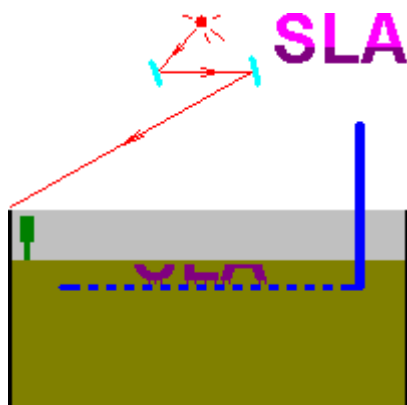
уровнем детализации.

В английской литературе обычно именуется кратко — SLA (сокращенно от Stereolithography). Этот метод стоит немного особняком от других, так как использует в качестве

«строительного материала» не порошки, а фотополимеры в жидком состоянии.

Фотополимер — это вещество, изменяющее свои свойства под воздействием света, обычно ультрафиолетового. Т.е. в обычном состоянии (кстати говоря, не обязательно жидком) они хрупкие и податливые, а при попадании под УФ-излучение электромагнитного диапазона приобретают прочность. Продолжительность облучения и длина волны не может быть произвольной. Она рассчитывается в зависимости от конкретного материала, размеров объекта и условий окружающей среды. Под конкретные нужды подбирают различные источники излучения — лампы — дневного света, ртутные, аргоновые, импульсные, ксеноновые, светодиодные и т.д.

В емкость с жидким фотополимером помещается сетчатая платформа, на ней будет происходить выращивание прототипа. Изначально платформа находится на такой глубине, чтобы ее покрывал тончайший слой полимера толщиной от 0.05 до 0.15мм — это и есть приблизительная толщина слоя в стереолитографии. Далее включается лазер, который воздействует на те участки полимера, которые соответствуют стенкам целевого объекта, вызывая их затвердевание. После этого вся платформа погружается чуть глубже, на величину, равную толщине слоя. Также в этот момент специальная щетка орошает участки, которые могли остаться сухими вследствие некоторого поверхностного натяжения жидкости.



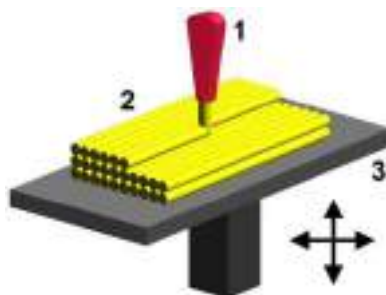
По завершению построения объект погружают в ванну со специальными составами для удаления излишков и очистки. И, наконец, финальное облучение светом для окончательного отвердевания. Как и многие другие методы 3D-прототипирования, SLA требует возведения поддерживающих структур, которые вручную удаляются по завершении строительства.

Необходимо понимать, что из-за выборочного отвердевания накладываются жесткие двусторонние ограничения на компоненты и технологию процесса. Например, чем гуще смола изначально, тем легче её перевести в полимерное состояние, но и тем хуже её гидромеханические качества. Чем мощнее введенный в смолу фотоинициатор, тем меньшее время нужно слабому лазеру для засветки, но и тем меньшее время жизни у всего объёма смолы, так как он подвержен фоновой засветке. Именно золотая середина в технологии и компонентах является «ноу-хау» каждого производителя лазерных стереолитографов. Устройство и принцип действия таких машин у всех производителей идентичны, поэтому в любой SLA-машине возможно применение любого расходного материала после соответствующей настройки.

Моделирование методом наплавления (FDM)

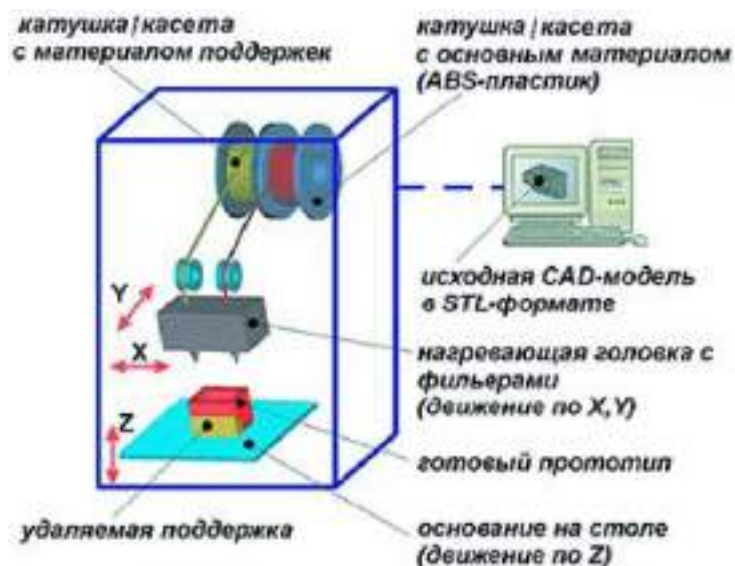
Принцип построения

3D модель в формате STL передаётся в программное обеспечение 3d-принтера. Программа автоматически (или оператор вручную) располагает модель в виртуальном пространстве рабочей камеры. Затем, программа автоматически генерирует элементы поддерживающих конструкций и проводит расчет расходных материалов, а также времени выращивания прототипа. Перед запуском процесса трехмерной печати трехмерная модель автоматически разделяется на горизонтальные слои и производится расчёт путей перемещения печатающей головки. Затем запускается непосредственно



сам процесс печати: нагревающая головка с фильерами расплавляет тонкую пластиковую нить (леску), и послойно укладывает ее согласно данным математической 3D- модели.

Схема работы FDM-принтера



Материалы

[ABSPlus](#) - высокопрочный промышленный термопластик [ABS-M30](#) - высокопрочный промышленный пластик

[ABS-M30i](#) - биосовместимый высокопрочный промышленный пластик

[ABSi](#) - биосовместимый, прозрачный пластик

[ABS-ESD7](#) - антистатический пластик [PC](#) - высокопрочный поликарбонат

[PC-ABS](#) - высокопрочный поликарбонат

[PC-ISO](#) - биосовместимый высокопрочный поликарбонат [ULTEM 9085](#) - огнестойкий высокотехнологичный термопластик

[PPSF/PPSU](#) - химико- и теплостойкий высокотехнологичный термопластик

Свойства прототипа

Детали, получаемые по технологии FDM – одноцветные, прочные и упругие.

Цвет

Стандартный цвет пластика ABSPlus - белый. Однако, этот вид пластика так же доступен еще в 8 цветах: слоновая кость, черный, красный, оливковый, зеленый, нектарин, флуоресцентный желтый, синий, серый.

Точность

Точность построения моделей составляет от 0,127 мм до 0,254 мм. Поверхность слегка ребристая (ступенчатая) (в пределах 0,5 мм). Ребристость обусловлена тем, что расплавленная нить ABSPlus имеет округлую форму.

Последующая обработка

- Удаление материала поддержки
 - BST - материал поддержки выполнен из красноватого пластика и отделяется методом "отламывания". Процедура требует аккуратности и существенных усилий.
 - SST - детали отделяются от поддержки в подогреваемой щелочной ванне (поставляется в комплекте с машиной).
- Обработка прототипа после печати

- Выращенная поверхность будет немного ребристой в силу большой толщины нити.
- Обрабатывать изделия потребуется только в тех случаях, когда требуется идеально гладкая поверхность.
- Дополнительные возможности
- Прототипы легко красятся обычной краской или автоэмалью.
- Прототипы можно сверлить, полировать или шлифовать.
- Части моделей легко склеиваются между собой любым клеем для пластика.

Лучшее использование

Технология FDM – готовое решение для печати прототипов или готовых деталей средних и больших размеров, с простой или средней сложностью поверхности (не подойдет для маленьких моделей со сложной поверхностью, ювелирных изделий). Основным достоинством метода является достаточная дешевизна модели, хорошие механические свойства (если необходимы работающие прототипы сложных механизмов), стабильность геометрических размеров, возможность последующей доработки (склейка, покраска). Из недостатков можно выделить только невысокое качество построений мелких элементов, зависимость прочности от направления слоев, также метод не совсем подходит для мастер-модели при изготовлении силиконовых форм.

Несмотря на то, что первой технологией аддитивного производства, примененной для создания металлических трехмерных прототипов, стал метод экструзионного послойного наплавления (FDM), наибольшую популярность при производстве металлических деталей завоевали технологии лазерного и электронно-лучевого спекания и плавки.

Технологии лазерного спекания и лазерной плавки (SLS, DMLS и SLM)

В основе метода «выборочного лазерного спекания» (SLS или Selective Laser Sintering) лежит использование лазерных излучателей высокой мощности (как правило, углекислотных) для частичного сплавления, или «спекания», расходного материала в единое целое. Перед использованием расходный материал измельчается до консистенции пудры с помощью шаровых мельниц. Минимальный размер частиц может достигать двух микрон.

Уже доказано, что металлические изделия, напечатанные на 3D-принтерах, по своим свойствам – плотности, остаточному напряжению, механическому поведению, неравновесной микроструктуре, кристаллографической текстуре – в лучшую сторону отличаются от изделий, созданных литейным и другими деформируемыми методами.

Схема устройства для селективного лазерного спекания

В качестве материала могут использоваться различные полимеры и, что особенно интересно, металлы и металлические сплавы с высокой температурой плавления. В отличие от стандартной экструзионной печати (FDM), технология позволяет спекать



— однородный материал без связующих добавок. Таким образом, нет необходимости в термической обработке, фактически спеканию, готовых моделей после печати, а сами модели обладают высокой прочностью, приближающейся к показателям литых образцов. Данный метод постройки металлических моделей без применения связующих материалов получил название «прямого лазерного спекания металлов» ([DMLS](#) или [Direct Metal Laser Sintering](#)).

Образец металлической детали турбины, созданной с помощью устройства 3D System ProX 200 методом прямого лазерного спекания

Как и другие технологии 3D-печати, лазерное спекание создает модели послойно. Процесс в чем-то схож с лазерной стереолитографией: в случае со стереолитографическими принтерами модели погружаются в жидкую фотополимерную смолу на глубину, соответствующую толщине одного слоя, с последующим «вычерчиванием» нового слоя лазерным лучом. При лазерном спекании на модель наносится слой порошка толщиной в один слой (толщина слоя может регулироваться), в котором вычерчивается новый контур, а высокая температура позволяет частично расплавлять порошок в местах касания луча, спекая частицы между собой и с предыдущим слоем. И в том и в другом случае модель окружена неизрасходованным материалом до окончания печати.

Этот момент немаловажен для «порошковой» печати: при спекании неизрасходованный материал служит в качестве поддерживающей поверхности для последующих слоев моделей сложной формы. Отсутствие необходимости печатать «опоры» облегчает обработку готовых моделей и способствует экономии материала, который в случае с титаном или специальными сплавами может быть весьма дорог. Весь неиспользованный материал может быть собран и использован для печати последующих моделей.

Исходным материалом для промышленной 3D-печати служат композиции различных мелкодисперсных металлических порошков на основе титана, алюминия, никеля, кобальта и других металлов. Как правило, они должны обладать сферичностью, определенным гранулометрическим составом с высоким выходом годного, высокой химической однородностью, пониженным содержанием газовых примесей – кислорода и азота. Единственным существенным недостатком лазерного спекания металлических материалов считается пористость готовых моделей. Однако плотность можно повысить за счет повышения энергии лазера и замедления скорости печати. В результате, рабочий материал можно не просто «спекать»

в местах касания гранул, а фактически расплавлять, создавая однородное вещество. Именно этот подход и получил название «выборочной лазерной плавки» (SLM – Selective Laser Melting).

Ведущей компанией в сфере печати лазерным спеканием и плавкой можно считать 3D Systems – промышленного гиганта, в 2013 году прибравшего к рукам компанию-разработчика SLS- технологий Phenix Systems.

Лазерная стереолитография (англ. *laser stereolithography, SLA*) — 3D-печать, с помощью которой объект формируется из жидкого фотополимера, затвердевающего под воздействием лазерного или ультрафиолетового излучения. Процесс формирования объекта происходит в ванне с жидким фотополимером. На платформе, погруженной в фотополимер путем засветки формируется изображение первого слоя объекта и происходит кристаллизация фотополимера. Затем платформа перемещается на толщину одного слоя (6-100 мкм) вверх и происходит формирование следующего слоя. Процесс формирования слоев продолжается до полного построения объекта, при этом жидкий полимер затвердевает и превращается в достаточно прочный пластик.

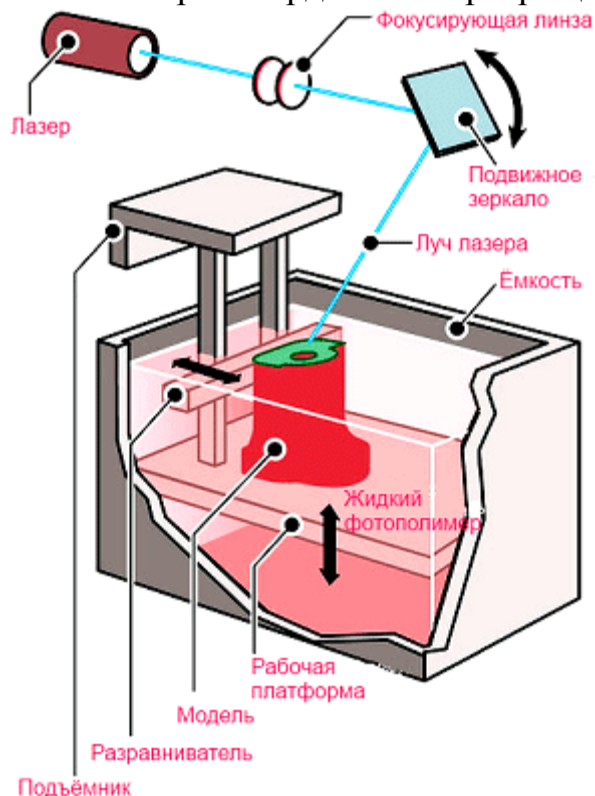


Схема 3D-печати SLA

Этот метод 3D-печати немного отличается от других, так как в качестве «строительного материала» используются не порошки, а фотополимеры в жидком состоянии. SLA технология применяется в промышленных 3D-принтерах. С помощью лазерной стереолитографии получают объекты с высокой (до 6 микрон) точностью и гладкой, почти глянцевой, поверхностью не требующей постобработки.



Фотополимерный 3D-принтер и модель из фотополимера

Полимеризация фотополимерного пластика ультрафиолетовой лампой (англ. *Digital Light Processing, DLP*) — технология похожа на предыдущую (SLA), но пластик твердеет под действием ультрафиолета. DLP технология может использоваться как в промышленных, так и бытовых 3D-принтерах.

Выборочное лазерное спекание (англ. *selective laser sintering, SLS*) — 3D-печать, с помощью которой объект формируется из порошкового материала (пластик, металл) в следствие его расплавления лазерным лучом. При SLS печати, материал наносится на платформу тонким равномерным слоем (специальным выравнивающим скребком), после чего на поверхности платформы лазерным излучением формируется первый слой объекта. Затем платформа опускается на толщину одного слоя (16-80 мкм) и на неё вновь наносится порошковый материал. Температура в рабочей камере в процессе 3D-печати поддерживается на уровне чуть ниже точки плавления рабочего материала, что позволяет уменьшить необходимую для сплавления мощность лазера. Для предотвращения окисления материала процесс проходит в бескислородной среде.

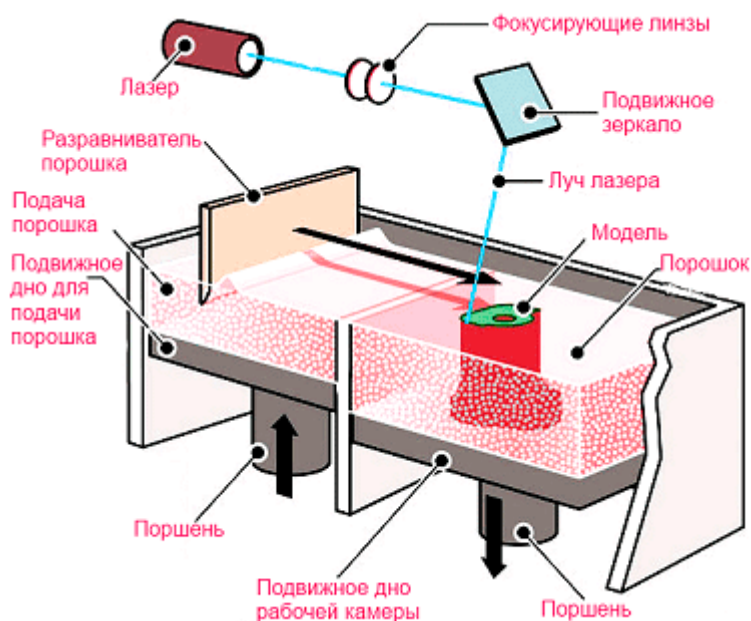
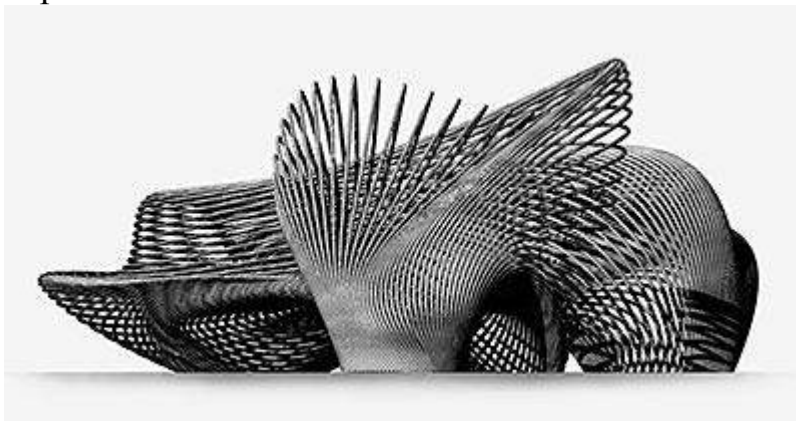


Схема 3D-печати SLS

Метод SLS-печати позволяет получать, в том числе, прочные металлические изделия, не уступающие аналогам произведенным

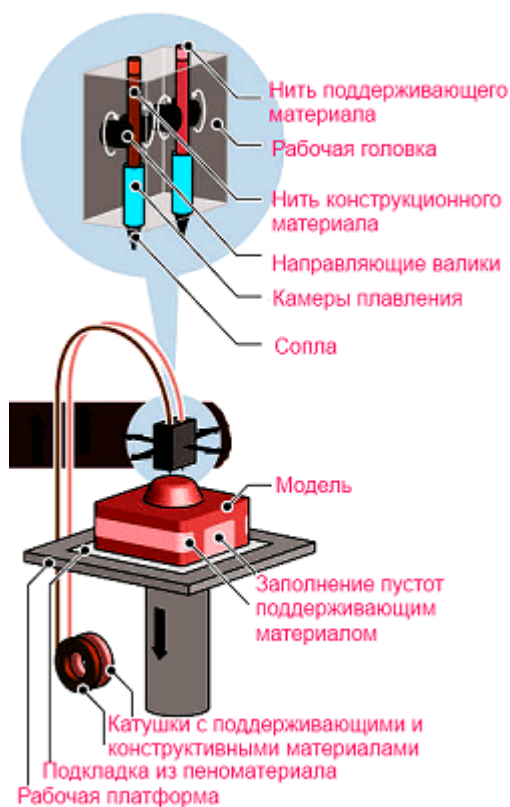
традиционными способами, но в отличие от последних, имеющие сложную внутреннюю структуру. SLS применяется только в промышленных 3D-принтерах.



Изделие из металла полученное на 3D-принтере

Выборочное лазерное сплавление (англ. *Selective laser melting, SLM*) — технология лазерного плавления металлического порошка по математическим CAD-моделям. С помощью SLM-печати создаются сложные металлические детали узлов и агрегатов, а также неразборные конструкции с изменяемой геометрией.

Технология селективного лазерного плавления SLM очень похожа на SLS, однако в отличие от последней, материалы (порошки) подвергаются не спеканию, а плавлению до образования гомогенной (густой, пастообразной) массы, как это происходит в EBM-печати. В отличие от EBM, в SLM используется лазер. Данный процесс успешно заменяет традиционные методы производства, так как физико-механические свойства изделий, построенных по технологии SLM, зачастую превосходят свойства изделий, изготовленных традиционным способом. По принципу SLM построены только промышленные 3D-принтеры.



Технология 3D-печати FDM

Моделирование методом послойного наплавления (англ. *Fused deposition modeling, FDM*) — технология послойного создания трехмерных объектов за счет укладки расплавленной нити из плавкого материала (пластика, металла, воска). В качестве материалов для FDM-печати в большинстве случаев используются термопластики (ABS, PLA и др.), выпускаемые в виде катушек нитей или прутков.

FDM-печать была разработана в конце 1980-х годов С. Скоттом Краппом. Ее коммерческое распространение началось в 1990 году. На сегодняшний день FDM является самой распространенной технологией 3D-печати из-за простоты конструкции и низкой стоимости подобных устройств.

Термин «Fused Deposition Modeling» и аббревиатура FDM являются торговыми марками компании Stratasys. Участники проекта RepRap, придумали аналогичный термин «Fused Filament Fabrication» или FFF (Производство способом наплавления нитей) для использования в обход юридических ограничений. Термины FDM и FFF равнозначны по смыслу и назначению.



Принцип печати по FDM/FFF технологии заключается в нанесении расплавленного материала на рабочую платформу. Нанесенный материал быстро остывает и переходит из вязкого состояния в твердое. Следующий слой наносится на предыдущий и тем самым спаивается с ним. В процессе печати пластиковая нить или пруток под воздействием высокой температуры в экструдере размягчается и выдавливается на платформу. Часто в данном способе печати используют две рабочие головки (экструдера) — одна выдавливает на платформу рабочий материал, другая — растворимый материал поддержки. Материал поддержки позволяет строить сложные объекты без провисания слоев.

FDM-печать применяется как в промышленных, так и в подавляющем большинстве современных бытовых 3D-принтерах. Технология на сегодняшний день настолько распространена, что понятия «бытовой принтер» и «FDM принтер» многие пользователи считают синонимами.

Электронно-лучевая плавка (англ. *Electron Beam Melting, EBM*) — аналогична SLS/DMLS, только здесь объект формируется путём плавления металлического порошка электронным лучом в вакууме.

Электронно-лучевая плавка — метод плавки металла путем применения электронного пучка. Используется при плавке особо чистых материалов, например, сталей и титана, и материалов, стойких к высокой температуре и химическим воздействиям. При EBM-печати практически отсутствует загрязнение материала посторонними примесями, так как процесс проходит в вакууме. Промышленные электронные плавильные печи позволяют производить изделия длиной в несколько метров и весом несколько тонн.

Технология многоструйного моделирования (англ. *Multi Jet Modeling, MJM*) — основана на многоструйном моделировании с помощью фотополимерного или воскового материала. Используется в 3D-принтерах компании 3D Systems серии ProJet. Аналогичной технологией является PolyJet от компании Stratasys, которая сопоставима по качеству, но использует более дешевые материалы.

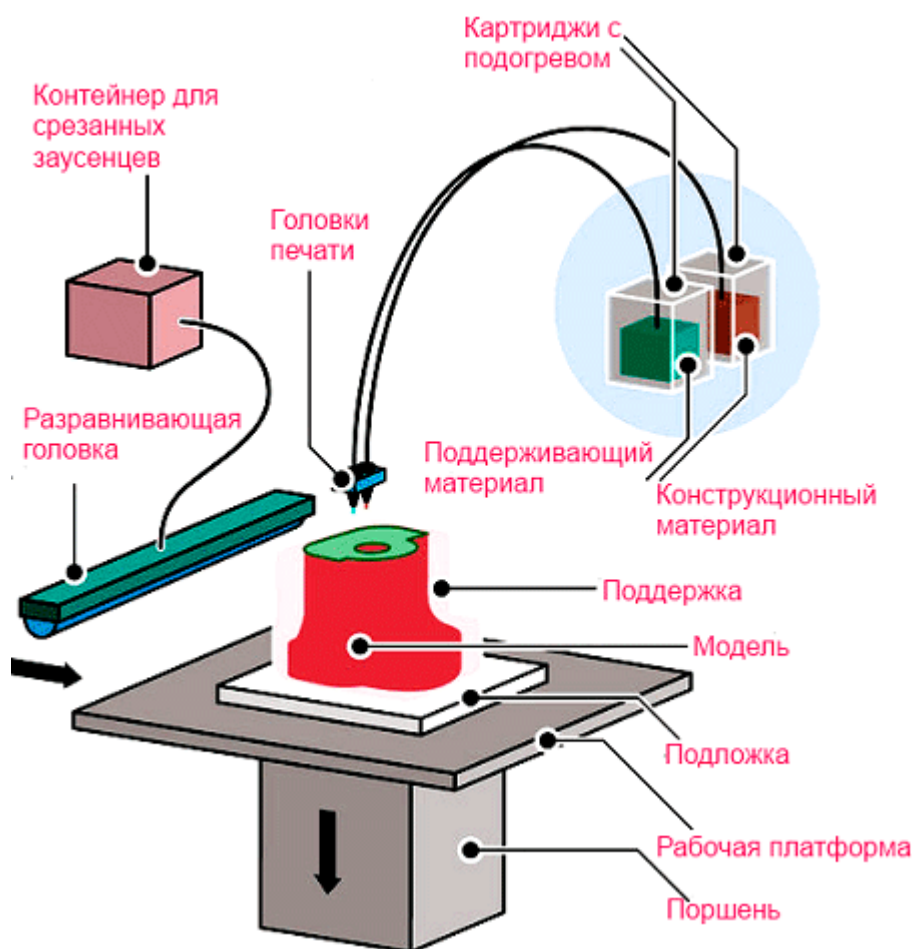


Схема 3D-печати MJM

Принцип MJM-печати заключается в следующем. Печатающая головка со множеством мельчайших сопел, расположенных линейно в несколько рядов наносит материал на рабочую поверхность по принципу струйной печати. Количество сопел начинается от 96 для младших моделей 3D-принтеров и достигает 448 для продвинутых моделей. Блок сопел движется вдоль рабочей поверхности и наносит слой жидкого фотополимера. Затем, УФ-лампа засвечивает только что нанесенные частицы материала, в результате чего тот затвердевает, формируя прочный слой. Операции нанесения и засвечивания материала повторяются до полного построения объекта.

Технология цветной струйной печати (англ. *Color Jet Printing, CJP*) — построена на принципе послойного склеивания и окрашивания композитного порошка на основе гипса или пластика. CJP применяется в 3D-принтерах компании 3D Systems серии ProJet. До этого данный принцип печати назывался 3D Printing (3DP) и был разработан в Массачусетском технологическом институте (MIT) в 1993 году. CJP (3DP) позволяет быстро создавать как одноцветные, так и полноцветные прототипы из композитного порошка.



Изделие полученное на CJP 3D-принтере

Принцип CJP-печати основан на склеивании основного материала (композитного порошка) связующим. Связующий материал — склеивает и окрашивает вместе частицы в нужных местах, формируя изделие. Построение объекта происходит послойно. Сначала материал модели равномерно тонким слоем распределяется по всей поверхности платформы камеры построения. Потом на этот слой наносится связующий материал, склеивая и окрашивая частицы между собой согласно цифровой 3D-модели. Затем платформа смещается вниз на толщину слоя (100 мкм). Операции нанесения материалов повторяются слой за слоем до полного построения модели.

Ламинирование (англ. *laminated object manufacturing, LOM*) — способ формирования объектов послойным склеиванием (нагревом, давлением) тонких листов рабочего материала с вырезанием (с помощью лазерного луча или режущего инструмента) соответствующих контуров на каждом слое.

Объекты, напечатанные техникой LOM, могут быть дополнительно модифицированы путем механической обработки или сверления после печати. Толщина слоя при печати таким способом зависит от используемого материала, как правило, равна толщине обычной бумаги для копирования.

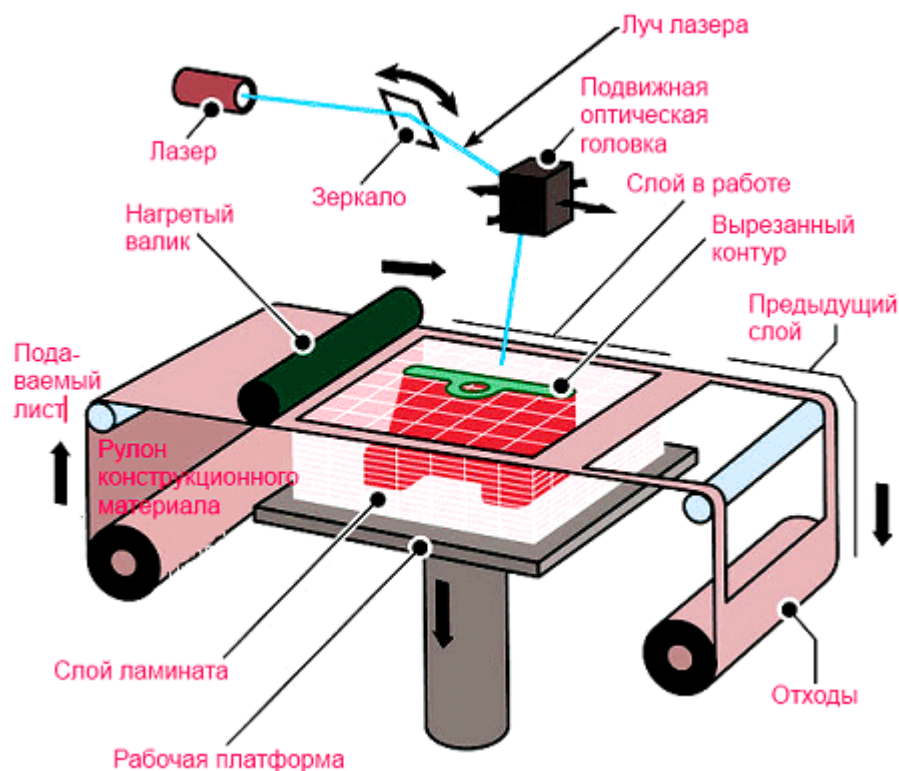


Схема 3D-печати LOM

Ламинирование не совсем относится к традиционным технологиям 3D-печати, поэтому не очень распространено. 3D-печать таким способом требует использования материала поддержки, который затем очень затруднительно удалять, особенно на объектах с высокой детализацией.

Биопринтеры — экспериментальные установки, в которых печать 3D-структуры будущего объекта (органа для пересадки) производится каплями, содержащими живые клетки. Далее деление, рост и модификации клеток обеспечивают окончательное формирование объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 336 с.
2. Малюх В. Н. Введение в современные САПР: Курс лекций. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 192 с. — ISBN 978-5-94074-551-8
3. Ушаков Д.М. Введение в математические основы САПР: курс лекций. — М.: ДМК Пресс, 2011. — 208с.
4. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп.. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 430 с. — ISBN 978-5-7038- 3275-2
5. Большаков В.П., Бочков А.Л., Лячек Ю.Т., Твердотельное моделирование деталей в CAD- системах: AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, Creo. —СПб.; Питер, 2015. — 480 с.
6. Муромцев Ю. Л., Муромцев Д. Ю., Тюрин И. В. и др. Информационные технологии в проектировании радиоэлектронных средств: учеб. пособие для студ. высш. учебн. заведений. — М.: Издательский центр "Академия", 2010. — 384 с. — ISBN 978-5-7695-6256-3
7. Гончаров П.С., Ельцов М.Ю., Коршиков С.Б., Лаптев И.В., Осиюк В.А. NX для конструктора- машиностроителя.— Москва: ИД ДМК Пресс, 2009. — 376 с. — ISBN 978-5-94074-590-7 УДК 681.3.068.5015 ББК 34.42 К63
8. Гончаров П.С., Ельцов М.Ю., Коршиков С.Б., Лаптев И.В., Осиюк В.А. NX для конструктора- машиностроителя.. — Москва: ИД ДМК Пресс, 2010. — 504 с. — ISBN 978-5-94074-590-7
9. Научно-практическая конференция «Аддитивные технологии в российской промышленности». Москва, 2015.

Периодические издания посвященные САПР

- ☐ CADmaster — бесплатный журнал, посвященный проблематике систем автоматизированного проектирования. Издаётся с 2000 года. Все статьи доступны в интернет-версии издания [18]. Проверено 4 x12 2010.
- ☐ САПР и графика — ежемесячный журнал, посвящённый вопросам автоматизации проектирования, компьютерного анализа, технологической подготовки производства и технического документооборота. Выпускается с 1996 года. Большая часть публикаций доступна на Web-сервере журнала [19]. Проверено 4 x12 2010.
- ☐ CAD/CAM/CAE Observer — международный информационно-аналитический PLM журнал, выходит с 2000 года. Часть опубликованных статей в открытом доступе на сайте журнала [20]. Проверено 4 x12 2010.
- ☐ Каталог САПР — первое русскоязычное периодическое издание в виде каталога по программам и производителям САПР. Выходит раз в 1,5 года. Информация о каталоге размещена на сайте проекта "CAD по-русски" [21]. Проверено 4 x12 2010.
- ☐ EDA Express — бесплатный журнал о технологиях проектирования и производства электронных устройств. Первое издание — 2000 год. Публикации доступны на сайте журнала [22]. Проверено 4 x12 2010.
- ☐ isicad.ru — электронный журнал о САПР, PLM и ERP, выходящий с 2004 года. Публикации доступны на сайте портала isicad [23]. Проверено 4 x12 2010.

Примечания

- [1] ГОСТ 34.003-90 (<http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=137473>)
«Информационная тех- нология. Комплекс стандартов на автоматизированные

системы. Термины и определения».

- [2] ГОСТ 23501.101-87 (<http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=140533>)
«Системы автоматизированного проектирования. Основные положения».
- [3] РД 250-680-88 (<http://www.docload.ru/Basesdoc/10/10101/index.htm>) «Методические указания. Автоматизированные системы. Основные положения».
- [4] ГОСТ 15971-90 (<http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=137975>) «Системы обработки информации. Термины и определения».
- [5] ГОСТ 23501.108-85 (<http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=142365>)
«Системы автоматизированного проектирования».
- [6] Стандарт ИСО 9004-1-94. Управление качеством и элементы системы качества (п.5.1.1).

CAE

- [1] CAELinux (<http://www.caelinux.com/CMS/>)
- [2] Adams for Multibody Dynamics
(<http://www.mscsoftware.com/Contents/Products/CAE-Tools/Adams.aspx>)
- [3] Универсальный механизм: динамика машин и механизмов, динамика автомобилей и железнодорожных экипажей, прикладная механика, кинематика, обратная кинематика
(http://www.umlub.ru/index_rus.htm)
- [4] EULER — автоматизированный динамический анализ многокомпонентных механических систем (<http://www.euler.ru/>)
- [5] frund — Комплекс моделирования динамики систем твердых и упругих тел
(<http://frund.vstu.ru>)
- [6] MBDyn — MultiBody Dynamics (<http://www.aero.polimi.it/~mbdyn/>)
- [7] ITI — Supporting your visions!: SimulationX (<http://www.simulationx.com/>)

Ссылки

- [1] http://shatura.laser.ru/Rapid/rptree/rptree_ru.html
- [2] http://www.espotec.ru/art_prot.htm
- [3] <http://home.att.net/~castleisland/home.htm>
- [4] <http://www.cadmaster.ru/>
- [5] <http://www.sapr.ru>
- [6] <http://www.cadcamcae.lv>
- [7] http://www.cadcatalog.ru/sapr_about_book.html
- [8] <http://www.rodnik.ru/product/sapr/edaexpress/>
- [9] <http://isicad.ru>
(<http://www.solidworld.ru/>) — SolidWorld
(<http://fsapr2000.ru/>) — Конференция САПР2000 (бывший САПР2К), посвященная использованию CAD/CAE/CAM-технологий
(<http://www.procae.ru/proCAE>) — статьи по программам ANSYS, STAR-CD, QForm, Nastran, Fluent и

др.

(<http://www.ansys.spb.ru/>) — Новости CAE-системы ANSYS на русском языке
(http://www.FEA.ru/ANSYS_LSDYNA_AviGallery.html) — AVI-Галерея (более 150 анимационных

фильмов), иллюстрирующая результаты исследований, выполненных сотрудниками CompMechLab® СПбГПУ с помощью CAE-систем ANSYS, LS-DYNA, SIMULIA/Abaqus
(<http://www.ansys.spb.ru/ansys-wall-planner/>) — Результаты ежегодных Всемирных конкурсов CAE- системы ANSYS Multiphysics Image Gallery Competition
(http://www.FEA.ru/FEA_news_1760.html) — CompMechLab® СПбГПУ представляет 4 ВИДЕО УРОКА по применению CAE-системы ANSYS / Mechanical
(http://www.fea.ru/FEA_news_1779.html) — CompMechLab-REVIEW. Лидеры CAE-рынка ANSYS, Inc.

– 40 лет

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебно-методическому
комплексу
С.А.Упоров

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Б1.О.24 ОСНОВЫ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Направление

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Авторы: Дроздова И.В., доцент, к.э.н., Моор И.А. доцент, к.э.н.,
Гензель О.В., ст. преподаватель

Одобрены на заседании кафедры
Экономики и менеджмента
(название кафедры)

Зав. кафедрой
(подпись)
Мочалова Л.А.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 04.10.2023
(Дата)

Рассмотрены методической комиссией
Горно-механический факультет
(название факультета)

Председатель
(подпись)
Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 20.10.2023
(Дата)

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	6
ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ... ..	8
САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ	11
ПОДГОТОВКА К ДОКЛАДУ С ПРЕЗЕНТАЦИЕЙ	15
ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ.	20
ПОДГОТОВКА К ДИСКУССИИ.....	22
ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ.....	24

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении – это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной и научной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества бакалавра и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знаний должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;

- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны – это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа – практические занятия;
2. внеаудиторная самостоятельная работа – подготовка к практическим занятиям, подготовка к устному опросу, участию в дискуссиях, решению практико-ориентированных задач и др.

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине *«Основы проектной деятельности»* обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к сдаче экзамена.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «*Основы проектной деятельности*» являются:

- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);
- подготовка к практическим занятиям (в т.ч. ответы на вопросы для самопроверки (самоконтроля), ответы на тестовые задания);
- выполнение самостоятельного письменного домашнего задания (практико-ориентированного задания);
- выполнение курсового проекта;
- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

Тема 1. Введение в управление проектами

1. В чем заключается суть концепции управления проектами?
2. Что представляет собой проект как процесс точки зрения системного подхода?
3. Назовите основные элементы проекта.
4. Перечислите этапы развития методов управления проектами (УП).
5. В чем сущность УП как методологии?
6. Охарактеризуйте проект как совокупность процессов.
7. В чем заключается взаимосвязь УП и управления инвестициями?
8. Какова взаимосвязь между управлением проектами и функциональным менеджментом.
9. Назовите предпосылки (факторы) развития методов УП.
10. Каковы перспективы развития УП?
11. Определите задачи и этапы перехода к проектному управлению.
12. Перечислите и определите базовые понятия УП.
13. Приведите принципы классификации типов проектов.

Тема 2. Система стандартов и сертификации в области управления проектами

1. Сделайте обзор стандартов в области УП.
2. Какие группы стандартов применяются к отдельным объектам управления проектами (проект, программа, портфель проектов)?
3. Дайте характеристику группе стандартов, определяющих требования к квалификации участников УП (менеджеры проектов, участники команд УП).
4. Какие стандарты, применяются к системе УП организации в целом и позволяющие оценить уровень зрелости организационной системы проектного менеджмента?
5. Каковы основы и принципы Международной сертификации по УП?
6. В чем заключается сертификация по стандартам IPMA, PMI?

Тема 3. Жизненный цикл проекта и его фазы

1. Каковы основные понятия, подходы к определению и структуре проектного цикла?
2. Назовите этапы реализации, состав основных предпроектных документов предынвестиционной фазы.

3. В чем заключается проектный анализ и оценка жизнеспособности и финансовой реализуемости в рамках прединвестиционной фазы?
4. Каково содержание инвестиционной и эксплуатационной фаз жизненного цикла проекта?
5. Охарактеризуйте состав и этапы разработки проектной документации строительной фазы проекта.
6. Каково содержание завершения инвестиционно - строительного этапа проекта.
7. Назовите этапы эксплуатационной фазы, в чем ее содержание, как определяется период оценки?

Тема 4. Процессы и методы управления проектами

1. В чем заключается сущность планирования проекта?
2. Каковы могут быть основные цели и задачи проекта?
3. Каковы требования к информационному обеспечению планирования?
4. Назовите основные методы планирования.
5. В чем сущность методов управления проектом: диаграммы Ганта; сетевого графика?
6. Каковы цели и содержание контроля и регулирования проекта?
7. Как осуществляются: мониторинг работ по проекту; измерение процесса выполнения работ и анализ результатов, внесение корректив; принятие решений; управление изменениями?
8. В чем заключается управление стоимостью проекта, каковы основные принципы; методы оценки?
9. Какова сущность бюджетирования проекта и контроля стоимости?
10. Дайте характеристику процесса управления работами по проекту: взаимосвязью объектов, продолжительностью и стоимостью работ.
11. Каковы принципы эффективного управления временем?
12. Назовите формы контроля производительности труда.
13. Какова роль и сущность менеджмента качества в проектном управлении?
14. В чем заключается процесс управления ресурсами проекта?
15. Назовите процессы, принципы управления ресурсами в проекте - управления закупками и запасами?
16. Как осуществляется правовое регулирование закупок и поставок, проектная логистика?
17. В чем заключается управление командой проекта?
18. Определите основные понятия, принципы, организационные аспекты создания команды.
19. Как осуществляется управление взаимоотношениями в проекте?
20. В чем особенности формирования организационной культуры?

Тема 5. Информационное обеспечение проектного управления

1. В чем сущность управления коммуникациями проекта?
2. Что собой представляет информационная система управления проектами и каковы ее элементы?
3. Приведите ключевые определения и потребности ИСУП.
4. Какова структура ИСУП?
5. Проведите обзор рынка программного обеспечения управления проектами.
6. Каковы требования к информационному обеспечению на разных уровнях управления?

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Концепция управления проектами

- Проект
- Проектное управление.
- Проект как совокупность процессов.
- Переход к проектному управлению.
- Модель управления проектами (УП).
- Структуризация (декомпозиции) проекта.
- Фазы, функции и подсистемы УП.
- Классификационные признаки и виды проектов.
- Цель и стратегия проекта.
- Сценарии и стратегии развития проектного комплекса.
- Результат проекта.
- Управление параметрами проекта.
- Окружение проектов.
- Проектный цикл.
- Методы управления проектами.
- Организационные структуры УП.
- Участники проектов.

Тема 2. Международные стандарты и сертификация в области проектного управления

- Стандартизация и сертификация в проектном управлении
- Группы стандартов
- Международная сертификация по УП.
- Обзор стандартов проектного управления

Тема 3. Жизненный цикл проекта и его фазы

- Жизненный цикл проекта.
- Фазы, этапы разработки и осуществления инвестиционного проекта.
- Предынвестиционная фаза проекта.

- Состав основных предпроектных документов.
- Инвестиционная фаза проекта.
- Этапы разработки проектной документации.
- ТЭО проекта.
- Организации СМР.
- Эксплуатационная фаза проекта.

Тема 4. Процессы и методы управления проектами

- Планирования проекта
- Информационное обеспечение планирования
- Методы планирования.
- Диаграмма Ганта
- Сетевой график
- Контроль и регулирование проекта
- Мониторинг работ по проекту
- Управление изменениями
- Управление стоимостью проекта
- Бюджетирование проекта
- Управление работами по проекту
- Эффективное управление временем
- Менеджмента качества в проектном управлении
- Управление ресурсами проекта
- Управление закупками и запасами
- Правовое регулирование проекта
- Проектная логистика
- Управление командой проекта
- Управление взаимоотношениями в проекте
- Формирование организационной культуры

Тема 5. Инвестиционный проект как объект управления

- Инвестиции
- Инвестиционный проект
- Бизнес-план

- Источники и способы финансирования инвестиционных проектов
- Жизненный цикл инвестиционного проекта
- Предпроектные документы
- Оценка жизнеспособности и финансовой реализуемости проекта
- ТЭО проекта
- Организации СМР
- Денежный поток инвестиционного проекта
- Финансовый анализ инвестиционного проекта
- Система показателей финансовой состоятельности проекта
- Система показателей оценки экономической эффективности
- Ставка дисконтирования
- Коэффициент дисконтирования
- Чистый дисконтированный доход (ЧДД)
- Индекс доходности (ИД)
- Срок окупаемости
- Внутренняя норма доходности (ВНД)
- Запас финансовой устойчивости (ЗФУ)
- Методы учета инфляции

Тема 6. Информационное обеспечение проектного управления

- Управления коммуникациями проекта
- Информационная система управления проектами
- Структура ИСУП
- Рынок программного обеспечения управления проектами.
- Информационное обеспечение управления проектами

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебными и научными изданиями профессиональной и общекультурной тематики – это важнейшее условие формирования научного способа познания.

Основные приемы работы с литературой можно свести к следующим:

- составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;
- перечень должен быть систематизированным (что необходимо для семинаров, что для экзаменов, что пригодится для написания курсовых и выпускных квалификационных работ (ВКР), а что выходит за рамки официальной учебной деятельности, и расширяет общую культуру);
- обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и выпускных квалификационных работ это позволит экономить время);
- определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;
- при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями и руководителями ВКР, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;
- все прочитанные монографии, учебники и научные статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»: можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);
- если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;
- следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать). Таким образом, чтение текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьёзный,

кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением, содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студентам с этой целью рекомендуется заводить специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);
- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить, как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);
- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);
- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;
- просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;
- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц; цель –

познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;

- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;

- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым, или, в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной и научной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках образовательной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное,

составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис – это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта – основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование – наиболее сложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

ПОДГОТОВКА ДОКЛАДА С ПРЕЗЕНТАЦИЕЙ

Одной из форм текущего контроля является доклад с презентацией, который представляет собой продукт самостоятельной работы студента.

Доклад с презентацией - это публичное выступление по представлению полученных результатов решения определенной учебно-практической, учебно-исследовательской или научной темы.

Как правило, в основу доклада ложится анализ литературы по проблеме. Он должен носить характер краткого, но в то же время глубоко аргументированного устного сообщения. В нем студент должен, по возможности, полно осветить различные точки зрения на проблему, выразить собственное мнение, сделать критический анализ теоретического и практического материала.

Подготовка доклада с презентацией является обязательной для обучающихся, если доклад презентацией указан в перечне форм текущего контроля успеваемости в рабочей программе дисциплины.

Доклад должен быть рассчитан на 7-10 минут.

Презентация (от англ. «presentation» - представление) - это набор цветных слайдов на определенную тему, который хранится в файле специального формата с расширением PP.

Целью презентации - донести до целевой аудитории полноценную информацию об объекте презентации, изложенной в докладе, в удобной форме.

Перечень примерных тем докладов с презентацией представлен в рабочей программе дисциплины, он выдается обучающимся заблаговременно вместе с методическими указаниями по подготовке. Темы могут распределяться студентами самостоятельно (по желанию), а также закрепляться преподавателем дисциплины.

При подготовке доклада с презентацией обучающийся должен продемонстрировать умение самостоятельного изучения отдельных вопросов, структурирования основных положений рассматриваемых проблем, публичного выступления, позиционирования себя перед коллективом, навыки работы с библиографическими источниками и оформления научных текстов.

В ходе подготовки к докладу с презентацией обучающемуся необходимо:

- выбрать тему и определить цель выступления.

Для этого, остановитесь на теме, которая вызывает у Вас больший интерес; определите цель выступления; подумайте, достаточно ли вы знаете по выбранной теме или проблеме и сможете ли найти необходимый материал;

- осуществить сбор материала к выступлению.

Начинайте подготовку к докладу заранее; обращайтесь к справочникам, энциклопедиям, научной литературе по данной проблеме; записывайте необходимую информацию на отдельных листах или тетради;

- организовать работу с литературой.

При подборе литературы по интересующей теме определить конкретную цель поиска: что известно по данной теме? что хотелось бы узнать? для чего нужна эта информация? как ее можно использовать в практической работе?

- во время изучения литературы следует: записывать вопросы, которые возникают по мере ознакомления с источником, а также ключевые слова, мысли, суждения; представлять наглядные примеры из практики;

- обработать материал.

Учитывайте подготовку и интересы слушателей; излагайте правдивую информацию; все мысли должны быть взаимосвязаны между собой.

При подготовке доклада с презентацией особо необходимо обратить внимание на следующее:

- подготовка доклада начинается с изучения источников, рекомендованных к соответствующему разделу дисциплины, а также специальной литературы для докладчика, список которой можно получить у преподавателя;

- важно также ознакомиться с имеющимися по данной теме монографиями, учебными пособиями, научными информационными статьями, опубликованными в периодической печати.

Относительно небольшой объем текста доклада, лимит времени, отведенного для публичного выступления, обуславливает потребность в тщательном отборе материала, умелом выделении главных положений в содержании доклада, использовании наиболее доказательных фактов и убедительных примеров, исключении повторений и многословия.

Решить эти задачи помогает составление развернутого плана.

План доклада должен содержать следующие главные компоненты: краткое вступление, вопросы и их основные тезисы, заключение, список литературы.

После составления плана можно приступить к написанию текста. Во вступлении важно показать актуальность проблемы, ее практическую значимость. При изложении вопросов темы раскрываются ее основные положения. Материал содержания вопросов полезно располагать в таком порядке: тезис; доказательство тезиса; вывод и т. д.

Тезис - это главное основополагающее утверждение. Он обосновывается путем привлечения необходимых цитат, цифрового материала, ссылок на статьи. При изложении содержания вопросов особое внимание должно быть обращено на раскрытие причинно-следственных связей, логическую последовательность тезисов, а также на формулирование окончательных выводов. Выводы должны быть краткими, точными, достаточно аргументированными всем содержанием доклада.

В процессе подготовки доклада студент может получить консультацию у преподавателя, а в случае необходимости уточнить отдельные положения.

Выступление

При подготовке к докладу перед аудиторией необходимо выбрать способ выступления:

- устное изложение с опорой на конспект (опорой могут также служить заранее подготовленные слайды);
- чтение подготовленного текста.

Чтение заранее написанного текста значительно уменьшает влияние выступления на аудиторию. Запоминание написанного текста заметно сковывает выступающего и привязывает к заранее составленному плану, не давая возможности откликаться на реакцию аудитории.

Короткие фразы легче воспринимаются на слух, чем длинные.

Необходимо избегать сложных предложений, причастных и деепричастных оборотов. Излагая сложный вопрос, нужно постараться передать информацию по частям.

Слова в речи надо произносить четко и понятно, не надо говорить слишком быстро или, наоборот, растягивать слова. Надо произнести четко особенно ударную гласную, что оказывает наибольшее влияние на разборчивость речи.

Пауза в устной речи выполняет ту же роль, что знаки препинания в письменной. После сложных выводов или длинных предложений необходимо сделать паузу, чтобы слушатели могли вдуматься в сказанное или правильно понять сделанные выводы. Если выступающий хочет, чтобы его понимали, то не следует говорить без паузы дольше, чем пять с половиной секунд.

Особое место в выступлении занимает обращение к аудитории. Известно, что обращение к собеседнику по имени создает более доверительный контекст деловой беседы. При публичном выступлении также можно использовать подобные приемы. Так, косвенными обращениями могут служить такие выражения, как «Как Вам известно», «Уверен, что Вас это не оставит равнодушными». Выступающий показывает, что слушатели интересны ему, а это самый простой путь достижения взаимопонимания.

Во время выступления важно постоянно контролировать реакцию слушателей. Внимательность и наблюдательность в сочетании с опытом позволяют оратору уловить настроение публики. Возможно, рассмотрение некоторых вопросов придется сократить или вовсе отказаться от них.

После выступления нужно быть готовым к ответам на возникшие у аудитории вопросы.

Стоит обратить внимание на вербальные и невербальные составляющие общения. Небрежность в жестах недопустима. Жесты могут

быть приглашающими, отрицающими, вопросительными, они могут подчеркнуть нюансы выступления.

Презентация

Презентация наглядно сопровождает выступление.

Этапы работы над презентацией могут быть следующими:

- осмыслите тему, выделите вопросы, которые должны быть освещены в рамках данной темы;
- составьте тезисы собранного материала. Подумайте, какая часть информации может быть подкреплена или полностью заменена изображениями, какую информацию можно представить в виде схем;
- подберите иллюстративный материал к презентации: фотографии, рисунки, фрагменты художественных и документальных фильмов, материалы кинохроники, разработайте необходимые схемы;
- подготовленный материал систематизируйте и «упакуйте» в отдельные блоки, которые будут состоять из собственно текста (небольшого по объему), схем, графиков, таблиц и т.д.;
- создайте слайды презентации в соответствии с необходимыми требованиями;
- просмотрите презентацию, оцените ее наглядность, доступность, соответствие языковым нормам.

Требования к оформлению презентации

Компьютерную презентацию, сопровождающую выступление докладчика, удобнее всего подготовить в программе MS PowerPoint.

Презентация как документ представляет собой последовательность сменяющих друг друга слайдов. Чаще всего демонстрация презентации проецируется на большом экране, реже – раздается собравшимся как печатный материал.

Количество слайдов должно быть пропорционально содержанию и продолжительности выступления (например, для 5-минутного выступления рекомендуется использовать не более 10 слайдов).

На первом слайде обязательно представляется тема выступления и сведения об авторах.

Следующие слайды можно подготовить, используя две различные стратегии их подготовки:

1-я стратегия: на слайды выносятся опорный конспект выступления и ключевые слова с тем, чтобы пользоваться ими как планом для выступления. В этом случае к слайдам предъявляются следующие требования:

- объем текста на слайде – не больше 7 строк;
- маркированный/нумерованный список содержит не более 7 элементов;

- отсутствуют знаки пунктуации в конце строк в маркированных и нумерованных списках;
- значимая информация выделяется с помощью цвета, кегля, эффектов анимации.

Особо внимательно необходимо проверить текст на отсутствие ошибок и опечаток. Основная ошибка при выборе данной стратегии состоит в том, что выступающие заменяют свою речь чтением текста со слайдов.

2-я стратегия: на слайды помещается фактический материал (таблицы, графики, фотографии и пр.), который является уместным и достаточным средством наглядности, помогает в раскрытии стержневой идеи выступления. В этом случае к слайдам предъявляются следующие требования:

- выбранные средства визуализации информации (таблицы, схемы, графики и т. д.) соответствуют содержанию;
- использованы иллюстрации хорошего качества (высокого разрешения), с четким изображением (как правило, никто из присутствующих не заинтересован вчитываться в текст на ваших слайдах и всматриваться в мелкие иллюстрации).

Максимальное количество графической информации на одном слайде – 2 рисунка (фотографии, схемы и т.д.) с текстовыми комментариями (не более 2 строк к каждому). Наиболее важная информация должна располагаться в центре экрана.

Обычный слайд, без эффектов анимации, должен демонстрироваться на экране не менее 10 - 15 секунд. За меньшее время аудитория не успеет осознать содержание слайда.

Слайд с анимацией в среднем должен находиться на экране не меньше 40 – 60 секунд (без учета времени на случайно возникшее обсуждение). В связи с этим лучше настроить презентацию не на автоматический показ, а на смену слайдов самим докладчиком.

Особо тщательно необходимо отнестись к оформлению презентации. Для всех слайдов презентации по возможности необходимо использовать один и тот же шаблон оформления, кегль – для заголовков - не меньше 24 пунктов, для информации - не менее 18.

В презентациях не принято ставить переносы в словах.

Наилучшей цветовой гаммой для презентации являются контрастные цвета фона и текста (белый фон – черный текст; темно-синий фон – светло-желтый текст и т. д.).

Лучше не смешивать разные типы шрифтов в одной презентации.

Рекомендуется не злоупотреблять прописными буквами (они читаются хуже).

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ

Практико-ориентированные задания выступают средством формирования у студентов системы интегрированных умений и навыков, необходимых для освоения профессиональных компетенций. Это могут быть ситуации, требующие применения умений и навыков, специфичных для соответствующего профиля обучения (знания содержания предмета), ситуации, требующие организации деятельности, выбора её оптимальной структуры личностно-ориентированных ситуаций (нахождение нестандартного способа решения).

Кроме этого, они выступают средством формирования у студентов умений определять, разрабатывать и применять оптимальные методы решения профессиональных задач. Они строятся на основе ситуаций, возникающих на различных уровнях осуществления практики и формулируются в виде производственных поручений (заданий).

Под практико-ориентированными заданиями понимают задачи из окружающей действительности, связанные с формированием практических навыков, необходимых в повседневной жизни, в том числе с использованием элементов производственных процессов.

Цель практико-ориентированных заданий – приобретение умений и навыков практической деятельности по изучаемой дисциплине.

Задачи практико-ориентированных заданий:

- закрепление, углубление, расширение и детализация знаний студентов при решении конкретных задач;
- развитие познавательных способностей, самостоятельности мышления, творческой активности;
- овладение новыми методами и методиками изучения конкретной учебной дисциплины;
- обучение приемам решения практических задач;
- выработка способности логического осмысления полученных знаний для выполнения заданий;
- обеспечение рационального сочетания коллективной и индивидуальной форм обучения.

Важными отличительными особенностями практико-ориентированных заданий от стандартных задач (предметных, межпредметных, прикладных) являются:

- значимость (познавательная, профессиональная, общекультурная, социальная) получаемого результата, что обеспечивает познавательную мотивацию обучающегося;
- условие задания сформулировано как сюжет, ситуация или проблема, для разрешения которой необходимо использовать знания из разных разделов основного предмета, из другого предмета или из жизни, на которые нет явного указания в тексте задания;

- информация и данные в задании могут быть представлены в различной форме (рисунок, таблица, схема, диаграмма, график и т.д.), что потребует распознавания объектов;

- указание (явное или неявное) области применения результата, полученного при решении задания.

Кроме выделенных четырех характеристик, практико-ориентированные задания имеют следующие:

1. по структуре эти задания – нестандартные, т.е. в структуре задания не все его компоненты полностью определены;

2. наличие избыточных, недостающих или противоречивых данных в условии задания, что приводит к объемной формулировке условия;

3. наличие нескольких способов решения (различная степень рациональности), причем данные способы могут быть неизвестны учащимся, и их потребуется сконструировать.

При выполнении практико-ориентированных заданий следует руководствоваться следующими общими рекомендациями:

- для выполнения практико-ориентированного задания необходимо внимательно прочитать задание, повторить лекционный материал по соответствующей теме, изучить рекомендуемую литературу, в т.ч. дополнительную;

- выполнение практико-ориентированного задания включает постановку задачи, выбор способа решения задания, разработку алгоритма практических действий, программы, рекомендаций, сценария и т. п.;

- если практико-ориентированное задание выдается по вариантам, то получить номер варианта исходных данных у преподавателя; если нет вариантов, то нужно подобрать исходные данные самостоятельно, используя различные источники информации;

- для выполнения практико-ориентированного задания может использоваться метод малых групп. Работа в малых группах предполагает решение определенных образовательных задач в рамках небольших групп с последующим обсуждением полученных результатов. Этот метод развивает навыки сотрудничества, достижения компромиссного решения, аналитические способности.

ПОДГОТОВКА К ДИСКУССИИ

Современная практика предлагает широкий круг типов практических занятий. Среди них особое место занимает *дискуссия*, где в диалоге хорошо усваивается новая информация, видны убеждения студента, обсуждаются противоречия (явные и скрытые) и недостатки. Для обсуждения берутся конкретные актуальные вопросы, с которыми студенты предварительно ознакомлены. Дискуссия является одной из наиболее эффективных технологий группового взаимодействия, обладающей особыми возможностями в обучении, развитии и воспитании будущего специалиста.

Дискуссия (от лат. *discussio* - рассмотрение, исследование) - способ организации совместной деятельности с целью интенсификации процесса принятия решений в группе посредством обсуждения какого-либо вопроса или проблемы.

Дискуссия обеспечивает активное включение студентов в поиск истины; создает условия для открытого выражения ими своих мыслей, позиций, отношений к обсуждаемой теме и обладает особой возможностью воздействия на установки ее участников в процессе группового взаимодействия. Дискуссию можно рассматривать как *метод интерактивного обучения* и как особую технологию, включающую в себя другие методы и приемы обучения: «мозговой штурм», «анализ ситуаций» и т.д.

Обучающий эффект дискуссии определяется предоставляемой участнику возможностью получить разнообразную информацию от собеседников, продемонстрировать и повысить свою компетентность, проверить и уточнить свои представления и взгляды на обсуждаемую проблему, применить имеющиеся знания в процессе совместного решения учебных и профессиональных задач.

Развивающая функция дискуссии связана со стимулированием творчества обучающихся, развитием их способности к анализу информации и аргументированному, логически выстроенному доказательству своих идей и взглядов, с повышением коммуникативной активности студентов, их эмоциональной включенности в учебный процесс.

Влияние дискуссии на личностное становление студента обуславливается ее целостно - ориентирующей направленностью, созданием благоприятных условий для проявления индивидуальности, самоопределения в существующих точках зрения на определенную проблему, выбора своей позиции; для формирования умения взаимодействовать с другими, слушать и слышать окружающих, уважать чужие убеждения, принимать оппонента, находить точки соприкосновения, соотносить и согласовывать свою позицию с позициями других участников обсуждения.

Безусловно, наличие оппонентов, противоположных точек зрения всегда обостряет дискуссию, повышает ее продуктивность, позволяет

создавать с их помощью конструктивный конфликт для более эффективного решения обсуждаемых проблем.

Существует несколько видов дискуссий, использование того или иного типа дискуссии зависит от характера обсуждаемой проблемы и целей дискуссии.

Условия эффективного проведения дискуссии:

- информированность и подготовленность студентов к дискуссии,
- свободное владение материалом, привлечение различных источников для аргументации отстаиваемых положений;
- правильное употребление понятий, используемых в дискуссии, их единообразное понимание;
- корректность поведения, недопустимость высказываний, задевающих личность оппонента; установление регламента выступления участников;
- полная включенность группы в дискуссию, участие каждого студента в ней.

Подготовка студентов к дискуссии: если тема объявлена заранее, то следует ознакомиться с указанной литературой, необходимыми справочными материалами, продумать свою позицию, четко сформулировать аргументацию, выписать цитаты, мнения специалистов.

В проведении дискуссии выделяется несколько этапов.

Этап 1-й, введение в дискуссию: формулирование проблемы и целей дискуссии; определение значимости проблемы, совместная выработка правил дискуссии; выяснение однозначности понимания темы дискуссии, используемых в ней терминов, понятий.

Этап 2-й, обсуждение проблемы: обмен участниками мнениями по каждому вопросу. Цель этапа - собрать максимум мнений, идей, предложений, соотнося их друг с другом.

Этап 3-й, подведение итогов обсуждения: выработка студентами согласованного мнения и принятие группового решения.

Далее подводятся итоги дискуссии, заслушиваются и защищаются проектные задания. После этого проводится "мозговой штурм" по нерешенным проблемам дискуссии, а также выявляются прикладные аспекты, которые можно рекомендовать для включения в курсовые и дипломные работы или в апробацию на практике.

Семинары-дискуссии проводятся с целью выявления мнения студентов по актуальным и проблемным вопросам.

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к экзамену по дисциплине *«Основы проектной деятельности»* обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить информацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины *«Основы проектной деятельности»*.

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

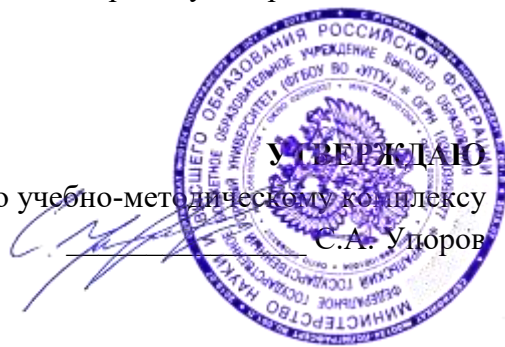
2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на экзамене особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на экзамене (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во-первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к экзамену на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
С.А. Угоров



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Б1.О.25 ЭЛЕКТРОПРИВОД

Направление -
15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -
Мехатроника и робототехника промышленных производств

форма обучения: очная
год набора: 2024

Одобрена на заседании кафедры

Электрификации горных предприятий

(название кафедры)

Зав. кафедрой

(подпись)

Садовников М.Е.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 01.09.2023

(Дата)

Рассмотрена методической комиссией
факультета

Горно-механического

(название факультета)

Председатель

(подпись)

Осипов П.А.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 20.10.2023

(Дата)

Екатеринбург

Оглавление

Введение

1. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором
 - 1.1 Обозначение электродвигателей
 - 1.2 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по 4-м точкам
 - 1.3 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по уравнению Клосса при помощи ПК
 - 1.3.1 Мой компьютер
 - 1.3.2 Электронная таблица – EXCEL
 - 1.3.3 Уравнение Клосса
2. Асинхронный электродвигатель с фазным ротором
 - 2.1 Назначение электродвигателей
 - 2.2 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором
 - 2.3 Определение количества и величины секций пускового резистора АД с фазным ротором
3. Двигатель постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения
 - 3.1 Обозначение ДПТ серии 4П
 - 3.2 Основные формулы, используемые при решении задач
 - 3.3 Определение количества и величины секций пускового резистора ДПТ с независимым возбуждением
4. Механика электропривода
 - 4.1 Статические и механические нагрузки
 - 4.2 Основное уравнение движения электропривода
 - 4.3 Приведение моментов сопротивления рабочей машины к валу электродвигателя
 - 4.4 Приведение моментов инерции рабочей машины к валу электродвигателя
 - 4.5 Расчёт времени пуска и торможения системы «электродвигатель-рабочая машина»
 - 4.6 Графоаналитический метод определения времени пуска системы «АД с к.з. ротором-вентилятор»
- Приложение А. Некоторые часто встречающиеся числа
- Приложение Б. Приставки к обозначениям единиц
- Приложение В. Единицы физических величин
- Приложение Г. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ
- Приложение Д. Основные технические данные электродвигателей серии АИ основного исполнения
- Приложение Е. Основные технические данные электродвигателей с фазным ротором
- Приложение Ж. Основные технические данные электродвигателей постоянного тока серии 4П
- Список литературы

Введение

Для обеспечения растущих потребностей человечества созданы, продолжают разрабатываться и совершенствоваться сотни тысяч рабочих машин, производственных и бытовых механизмов, подъёмно-транспортных средств и т.д.

Для функционирования рабочих машин и механизмов к их исполнительным органам от привода должна быть подведена механическая энергия, за счёт которой и совершается их движение. Характер этого движения может быть разнообразным: вращательным однонаправленным и реверсивным, поступательным однонаправленным и реверсивным, а также возвратно-поступательным. Основное назначение приводного электродвигателя заключается в преобразовании электрической энергии, потребляемой им из сети, в механическую, отдаваемую через вал двигателя.

Механические характеристики электроприводов необходимы для выбора рационального электропривода. Правильное сочетание механических характеристик электропривода и рабочей машины - одно из неперемняемых условий высоких технико-экономических показателей работы производственного агрегата.

Механическими характеристиками электродвигателя называются зависимости частоты или скорости вращения от вращающего момента $n = f_1(M)$ или $\omega = f_1(M)$. Электромеханическими характеристиками электродвигателя называются зависимости частоты или скорости вращения от силы тока $n = f_3(I)$ или $\omega = f_4(I)$.

Эти характеристики называются естественными, если они получены при номинальных условиях питания (при номинальных напряжении и частоте), номинальном возбуждении и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях ротора (или якоря) и статора. Характеристики двигателя называются искусственными при изменении любого из перечисленных выше факторов. Обычно при исследовании электроприводов механические характеристики изображают на графиках в виде функции $\omega = f(M)$. Однако в некоторых случаях (при теоретическом анализе механических характеристик) их изображают в виде функции $M = \varphi(\omega)$. При исследовании механических характеристик электродвигателей необходимо знать сопротивление их обмоток, а также значение вводимых в цепи обмоток пусковых, тормозных и других сопротивлений.

1. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором

1.1 Обозначение электродвигателей

Наиболее распространённой электрической машиной, применяемой для привода сельскохозяйственных машин и механизмов, является трёхфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Это обусловлено сравнительно небольшой его стоимостью, простотой конструкции и высокой надёжностью в эксплуатации.

Асинхронные электродвигатели в целях упорядочения их шкал мощностей, скоростей и т. д., а также унификации применения выпускаются сериями, как в основном исполнении, так и в различных модификациях, с учётом областей применения, климатических условий, степени защищённости и т. д.

Двигатели серии АИ - новая, разработанная совместно со странами Интерэлектро, унифицированная серия асинхронных двигателей, отвечающая перспективному уровню развития мирового электромашиностроения. Они предназначены для работы в зоне умеренного климата при температуре окружающей среды - 45...+40 °С и относительной влажности воздуха до 80% при температуре + 20 °С. По сравнению с двигателями серии 4АМ двигатели серии АИ имеют улучшенные энергетические показатели, снижен уровень шума, повышены надёжностные показатели.

Структура условного обозначения:

А И X₂ X₃ X₄ X₅X₆ X₇ X₈ X₉ X₁₀ X₁₁,

А - асинхронный;

И - унифицированная серия (Интерэлектро);

X₁ - привязка мощности к установочным размерам или обозначение специального исполнения; **Р** - привязка мощности к установочным размерам по РС3031-71, габариты и шкала мощностей соответствует двигателям серии 4АМ; **С** - привязка в соответствии с нормами CENELEC, при этом мощности в тех же габаритах снижены на одну-две ступени по сравнению с вариантом Р, предназначены только для поставок на экспорт. Отсутствие букв Р или С означает исполнение двигателя по варианту Р, **М** - взрывозащищённое исполнение; **У** - взрывозащищённое рудничное исполнение; **Ф** - с пристроенным вентилятором для охлаждения двигателя;

X₂ - буква - обозначение исполнения по виду защиты и охлаждения: закрытое с внешним обдувом корпуса со встроенным вентилятором (не указывается), **Б**-закрытое с естественным охлаждением, **Н** — защищённое, **Л** — открытое, **В**-встраиваемое, **П** — закрытое продуваемое;

X₃ - буква - обозначение модификаций: **С** - с повышенным скольжением, **Р**- с повышенным пусковым моментом, **Х** - с регулируемой частотой вращения, **Ф** - с фазным ротором, **У** — однофазные с пусковым конденсатором, **Е** - однофазные с рабочим конденсатором, **УЕ** - однофазные с пусковым и рабочим конденсатором, **Кр** - для кратковременного режима работы.

X₄ - габарит (высота оси вращения), мм;

X₅ - установочный размер по длине станины: **S**, **M**, **L**;

X₆ - длина сердечника статора (**A** или **B**, отсутствие буквы означает только одну длину сердечника - первую);

X₇ - число полюсов: 2, 4, 6, 8, 10, 12 (в многоскоростных число полюсов указывается через дробь - 2/4; 2/6; 4/6; 4/8 и др.);

X₈ и **X₉** - дополнительные буквы для модификации двигателя (**Б** - со встроенной температурной защитой; **П** - с повышенной точностью по установочным размерам; **X₂** - химически стойкие; **С** - сельскохозяйственные, **УП** - пылезащищённое исполнение; **РЗ** - для привода зубчатых редукторов; **Ж** - для моноблочных насосов; **Е** - с электромагнитным тормозом;

ЕЭ - с электромагнитным тормозом для электроталей; **Ф** - фреоно-маслостойкие;

Н - малошумные);

X₁₀ - климатическое исполнение (У, УХЛ, Т);

X₁₁ - категория размещения (1,2, 3,4, 5) по ГОСТ 15150-69.

Правильное обозначение модификаций и исполнений серии важно для автоматической системы управления производством (АСУП), а также для создания системы ведения чертёжного хозяйства как части общей системы автоматизированного проектирования (САПР).

Серия АИ содержит значительное количество модификаций и исполнений, поэтому задача выбора обозначений является весьма сложной. Для обозначения серии АИ принята структура, в которой можно выделить три вида обозначения: **базовое, основное, полное**.

Базовое обозначение - это сочетание элементов символов, определяющих серию АД, его мощность, частоту вращения (обозначение серии, вариант увязки мощности к установочным размерам, высота оси вращения, установочный размер по длине станины и длина магнитопровода статора, число полюсов).

Например: АИР100М4 (серия АИ, увязка по варианту Р, высота оси вращения 100, длина корпуса по установочным размерам М, число полюсов 4).

Основное обозначение - это сочетание базового исполнения АД с видом защиты и охлаждения, с электрической и конструктивной модификацией, со специализированным исполнением и исполнением по условиям окружающей среды.

Например: АИРБС100М4НПТ2 (АИР100М4 - базовое обозначение, Б - закрытое исполнение с естественным охлаждением без обдува, С - с повышенным скольжением, Н - малошумные, П - с повышенной точностью установочных размеров, Т - для тропического климата, 2 - категория размещения).

Полное обозначение - сочетание основного обозначения с дополнительными электрическими и конструктивными характеристиками.

Например: АИРБС 100М4НПТТ2 220/380 В, 60 IM2181, K3-11-3, F 100, (АИРБС 100М4НПТТ2 - основное обозначение, 220/380 В - напряжение, 60 - частота сети, IM2181 - исполнение по способу монтажа и по концу вала, K3-11-3 - исполнение выводного устройства и количество штуцеров, F100 - исполнение фланцевого щита).

Классификация конструктивных исполнений электрических машин **по способу монтажа** дана в Публикации МЭК 34-7 и в СТ СЭВ 246-76. Согласно этим документам конструктивное исполнение электрической машины обозначается символом IM и четырьмя цифрами.

Условное обозначение конструктивного исполнения расшифровывается так:

IM X₁ X₂X₃ X₄

IM - буквенная часть обозначения;

X₁ - первая цифра определяет группу конструктивных исполнений.

Серия АД Интерэлектро производится по трём группам исполнений (1 - на лапах, с подшипниковыми щитами; 2 - на лапах, с подшипниковыми щитами и с фланцем на подшипниковом щите или щитах; 3 - без лап, с подшипниковыми щитами и с фланцем на одном подшипниковом щите);

X₂X₃ - вторая и третья цифры обозначают способ монтажа.

Вторая цифра. Для группы IM1-0, Третья указывает на расположение вала двигателя в пространстве при монтаже. Для группы IM1 -третья цифра обозначает: 0 - вал горизонтальный, машина лапами вниз; 1- вал вертикальный, конец вала вниз; 3 - вал вертикальный, конец вала вверх; 5 - вал горизонтальный, конец вала влево, машина крепится лапами на вертикальной плоскости; 6 - вал горизонтальный, конец вала направо, машина крепится на вертикальной плоскости;

7 - вал горизонтальный, машина крепится на горизонтальной плоскости лапами вверх; 8 - машина может работать при любом направлении конца вала;

X₄ - исполнение выступающего конца вала: 0 - без конца вала;

1 - с одним цилиндрическим концом вала; 2 - с двумя цилиндрическими; 3- с одним

коническим; 4 - с двумя коническими; 6, 7 и 9 - в асинхронных двигателях общего назначения не применяются.

Обозначение исполнений вводных устройств расшифровывается так К-3-I - с панелью выводов и одним штуцером; К-3-II - с панелью выводов и двумя штуцерами; К-3-M - с панелью выводов и удлинителем под сухую разделку кабеля или под эпоксидную заделку; К-2-1-без панели выводов с одним штуцером; К-2-II-без панели выводов с двумя штуцерами.

Основным исполнением вводных устройств является устройство с панелью выводов и одним штуцером (К-3-I). По заказу потребителя заводы-изготовители двигателей устанавливают вводное устройство с двумя штуцерами. Два штуцера необходимо для ввода дополнительных проводов в двигатели с температурной защитой и др.

1.2 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по 4-м точкам

Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором характеризуется номинальными техническими данными, которые указываются в каталоге: P_n , кВт - номинальная мощность, n_n , об/мин - номинальная частота вращения вала электродвигателя при номинальной нагрузке, U_n , В - номинальное напряжение, I_n , А - номинальная сила тока, ($\sim$) — род тока, f_n , Гц - частота питающей сети, $\cos \varphi_n$ - коэффициент мощности при номинальной нагрузке, η_n - коэффициент полезного действия, кроме того в каталоге задаются: n_c , об/мин - синхронная частота вращения (частота вращения магнитного поля статора) $\mu_p = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_k}$ - кратность пускового момента, $M_k = \frac{M_{\text{макс}}}{M_n}$ - кратность максимального (или критического) момента.

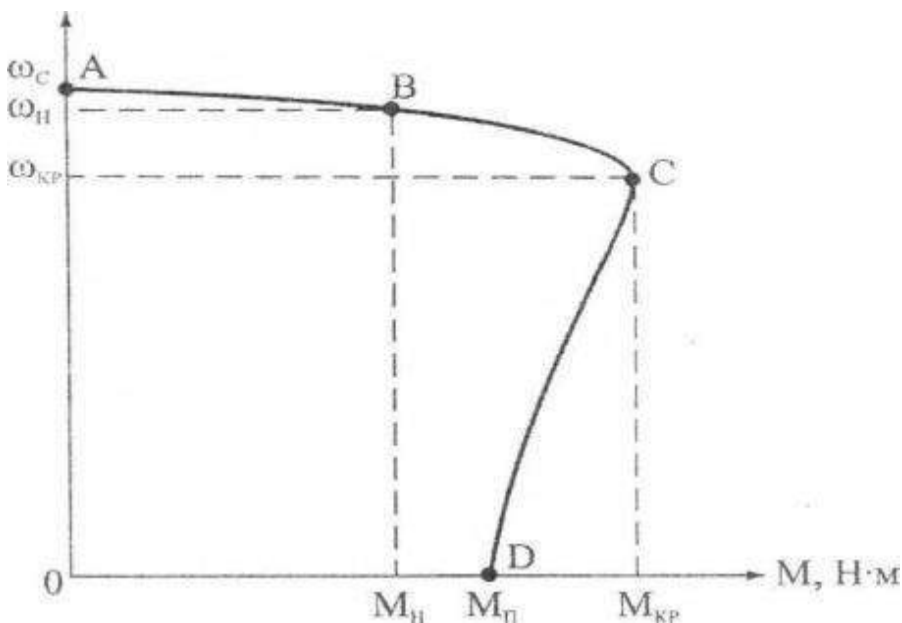
Естественную механическую характеристику асинхронного двигателя с к.з. ротором $\omega = f(M)$ ориентировочно можно построить, используя его данные из каталога, по 4 - м характерным точкам (рисунок 1.1):

Координаты точек:

Точка А ($M = 0$; $\omega = \omega_c$); ω_c - синхронная скорость вращения, рад/с. $\omega_c = \frac{\pi \cdot n_c}{30}$ (1.1)

Точка В ($M = M_n$; $\omega = \omega_n$); M_n - номинальный момент электродвигателя, Н м; ω_n - номинальная скорость вращения, рад/с.

$$M_n = 1000 \cdot \frac{P_n}{\omega_n}; \quad (1.2) \quad \omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}. \quad (1.3)$$



Точка С ($M = M_{кр}; \omega = \omega_{кр}$); $M_{кр}$ - момент критический (или максимальный), Н·м; $\omega_{кр}$ - критическая скорость вращения, рад/с.

$$M_{кр} = \mu_{кр} \cdot M_H; \quad (1.4)$$

$$\omega_{кр} = \omega_c(1 - S_{кр}), \quad (1.5)$$

где $S_{кр}$ - критическое скольжение, о.е.

$$S_{кр} = S_H \cdot (\mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}^2 - 1}). \quad (1.6)$$

Точка Д ($M = M_{пуск}; \omega = 0$); $M_{пуск}$ - пусковой момент электродвигателя, Н·м;

$$M_{пуск} = \mu_{п} \cdot M_H. \quad (1.7)$$

Примечание: Если нагрузка у АД с к.з. ротором номинальная и параметры сети соответствуют номинальным данным, то запуск электродвигателя осуществляется от точки Д далее точка С и рабочая точка - это точка В.

Задача 1.1. Для асинхронного электродвигателя с к.з. ротором типа АИР225М2, имеющего следующие паспортные данные:

$P_H = 55$ кВт; $n_H = 2940$ об/мин; $n_c = 3000$ об/мин; $\mu_{п} = 1,8$; $\mu_{кр} = 2,6$; построить естественную механическую характеристику по 4-м точкам:

1. Определяем синхронную скорость вращения ω_c , рад/с, по формуле

2.

$$\omega_c = \frac{\pi \cdot n_c}{30} \quad (1.8)$$

$$\omega_c = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

3. Определяем номинальную скорость вращения ω_H , рад/с, электродвигателя:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} \quad (1.9)$$

$$\omega_H = \frac{3,14 \cdot 2940}{30} = 307,7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

4. Определяем номинальный момент M_H , Н·м, электродвигателя:

$$M_H = 1000 \cdot \frac{P_H}{\omega_H} \quad (1.10)$$

$$M_H = 1000 \cdot \frac{55}{307,7} = 178,7 \text{ Н·м}.$$

5. Определяем критический момент $M_{кр}$, Н·м, электродвигателя:

$$M_{кр} = \mu_{кр} \cdot M_H \quad (1.11)$$

$$M_{кр} = 2,6 \cdot 178,7 = 464,6 \text{ Н·м}$$

6. Определяем номинальное скольжение S_H о.е., электродвигателя:

$$S_H = \frac{(n_c - n_H)}{n_c} \quad (1.13)$$

$$S_H = \frac{(3000 - 2940)}{3000} = 0.02$$

7. Определяем критическое скольжение $S_{кр}$, о.е., электродвигателя:

$$S_{кр} = S_H \cdot (\mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}^2 - 1}) \quad (1.13)$$

$$S_{кр} = 0.02 \cdot \left(2.6 + \sqrt{2.6^2 - 1} \right) = 0.1$$

8. Определяем критическую скорость вращения $\omega_{кр}$, рад/с, электродвигателя:

$$\omega_{кр} = \omega_c (1 - S_{кр}) \quad (1.14)$$

$$\omega_{кр} = 314(1 - 0.1) = 282.6 \text{ рад/с}$$

9. Определяем пусковой момент $M_{пуск}$, Н·м, электродвигателя:

$$M_{пуск} = \mu_{п} \cdot M_H \quad (1.15)$$

$$M_{пуск} = 1.8 \cdot 178.7 = 321.66 \text{ Н·м}$$

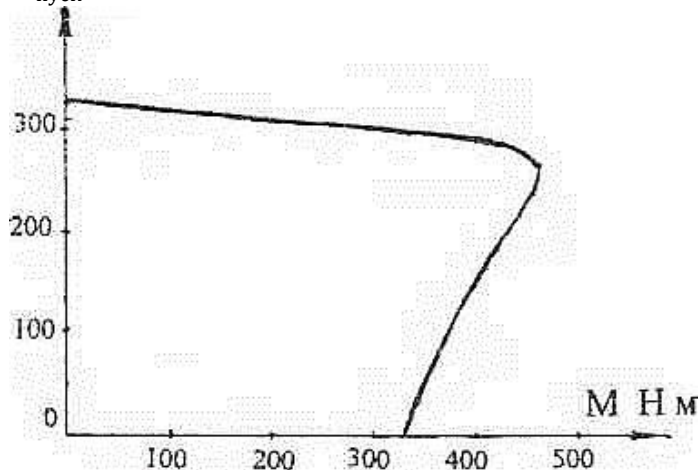


Рисунок 1.2 Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя типа АИР225М2

1.3 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по уравнению Клосса при помощи ПК

1.3.1 Мой компьютер

Персональный компьютер - это техническое средство, предлагающее сегодня пользователю всё, что необходимо для обработки информации на рабочем месте, и огромные по возможностям программные средства или математическое обеспечение для решения практически любых задач в самом доступном для пользователя виде.

Технические устройства ПК:

Стандартный комплект современного ПК включает в себя:

- системный блок
- монитор
- клавиатуру
- мышь с ковриком.

Системный блок - это основа ПК, в него входят устройства, определяющие всю работу по обработке информации.

Монитор - окно в ПК. Монитор даёт возможность ведения диалога с ПК, а диалог представляет основу работы пользователя на ПК.

Клавиатура - всю клавиатуру можно разбить на 4 зоны:

- основная (пишущая машинка);
- числовая (калькулятор);
- управления курсором;
- функциональная.

Основная. Расположение символов на основной части клавиатуры такое же, как и на пишущей машинке. Русские символы в соответствии с русскоязычной пишущей машинкой, а латинские символы - с англоязычной. Верхний ряд содержит цифры и специальные символы. Большая клавиша внизу - пробел (интервал между словами). Справа и слева - управляющие клавиши.

Ctrl - (контрол), правый и левый;

Alt - (альт), правый и левый;

Shift - (шифт), правый и левый.

У клавиатуры два регистра - нижний и верхний. В нижнем регистре находятся обычные символы, буквы и цифры. В верхнем регистре - заглавные буквы и некоторые специальные символы, которые, обычно, отображены на верху клавиши. Символ из верхнего регистра берётся при нажатой клавише Shift. Для закрепления верхнего регистра используется клавиша Caps Lock. Отключается верхний регистр повторным нажатием этой клавиши. Включённый верхний регистр отмечается включённым индикатором Caps на панели индикации в правом верхнем углу клавиатуры. Для переключения режимов клавиатуры (русский / латинский) в WINDOWS следует нажать одновременно Ctrl + Shift - левый или правый.

Клавиша Back Space стирает набранные символы (справа налево).

Клавиша Tab - табуляция.

Клавиша Enter - ввод, основная клавиша, вводит информацию в ОП для обработки, подтверждает выбор на экране, завершает выполнение команды.

Клавиша Esc (Escape) — в левом верхнем углу клавиатуры, отмена действия, отказ, сброс информации.

Числовая. (Правая часть клавиатуры). Расположение цифр подобно калькулятору. Эта часть клавиатуры может работать в двух режимах - для ввода чисел или для управления курсором. Режимы переключаются клавишей Num Lock. Включённый числовой режим отображается индикатором Num на табло индикации.

Курсор. - это указатель на экране. Символьный курсор - вертикальная мигающая чёрточка обозначает на экране место для ввода. Курсор-указатель - выделенный прямоугольник, перемещая который можно выбрать информацию на экране. Курсор перемещается по экрану клавишами-стрелками. Если информации много, то для перелистывания экранов используются клавиши PgUp и PgDn страница вверх и страница вниз. Home - перевод курсора в начало информации (списка, строки), End - перевод курсора в конец информации (списка, строки) Клавиша Ins (Inset - вставить) переключает режимы « Вставка » / « Замена ». В режиме « Вставка » символ с клавиатуры вставляется в позицию слева от курсора, раздвигая текст.

Клавиша Del (Delete - удалить) удаляет символ справа от курсора.

Функциональная. 12 клавиш в верхней части клавиатуры - F1, F2 F12.

Эти клавиши имеют конкретное назначение в каждом пакете программ и описываются в инструкциях.

Управление Мышью. При работе на ПК мышь становится основным инструментом в руках пользователя.

Рабочие элементы Мыши - это шарик на её нижней стороне и две рабочие клавиши наверху. При перемещении Мыши по коврику шарик вращается и перемещает стрелку-указатель по экрану.

Левая клавиша - 3 основных действия:

Одинарный щелчок. Выбирает объект на экране, вызывает команду из меню, нажимает кнопку на графическом экране, и т. д.

Двойной щелчок. Открывает папку, вызывает документ, выполняет другие операции по инструкции.

Перетаскивание. Перемещает объект, для этого; установить указатель мыши на нужный объект, нажать левую клавишу и, удерживая её, переместить мышь в нужном направлении. Выбранный объект перемещается вместе с мышкой и остаётся там, где опущена клавиша.

Правая клавиша.

Щелчок правой клавишей мыши вызывает контекстное меню.

Меню - это перечень команд для выбора пользователем. Контекстное меню всегда содержит только те команды, которые можно применить к выбранному мышкой объекту, работа с этим меню значительно упрощает поиск нужной команды.

1.3.2 Электронная таблица – EXCEL

Электронные таблицы сегодня являются самыми популярными программами для автоматизации обработки информации в любой сфере управления. Одних только математических, логических, бухгалтерских, статистических функций, которые Excel умеет выполнять над табличными данными, - более двухсот штук.

Рабочее поле Excel представляет собой не чистый лист, а пустую таблицу, которую предстоит заполнять.

Идея автоматизации расчётов в электронных таблицах очень простая:

В таблице добавляются номера строк и буквы столбцов, таблица становится адресной, т.е. у каждой клетки есть адрес, как на шахматной доске. Значит, у любой информации таблицы есть адрес, так же, как и у фигуры на шахматной доске. Теперь в таблице можно писать формулы расчёта, используя адреса с информацией.

	A	B	C	D	E
1	15	20	=A1+B1(35)	=10%*C1(3.5)	=C1-D1(31.5)
2					
3					

Когда исходные данные в адресах меняются, одновременно пересчитываются и все формулы с этими адресами.

Таким образом, надо только правильно задать формулы расчёта, и тогда достаточно ввести новые исходные данные и распечатать уже пересчитанную таблицу. Если при этом учесть, **ЧТО** размеры таблиц практически не ограничены, и в формулах можно использовать огромное количество функций, в том числе сложных математических функций и специальных функций EXCEL, и что работа в таблице полностью автоматизирована, то становится понятной растущая популярность этого пакета программ.

Вызов EXCEL

EXCEL входит в состав MS OFFICE и проще всего его вызвать щелчком мыши на кнопке с его значком на панели OFFICE в верхней части экрана Рабочего Стола.

Всегда можно вызвать EXCEL из списка программ через пусковое меню:

ПУСК - Программы - Microsoft Excel Экран EXCEL

Экран EXCEL - стандартное окно WINDOWS. Верхняя строка- заголовок, затем меню, под строкой меню находятся панели инструментов с кнопками-значками для быстрого вызова основных команд. По умолчанию, так же, как и в WORDe, на экране две основные панели - стандартная и форматирование. Другие панели можно устанавливать или убирать по мере необходимости, используя для этого команду:

Вид - Панели инструментов

Вызывается список панелей. Установленные панели отмечены слева галочкой. Нужная панель устанавливается или убирается щелчком мыши. Если необходимо полностью настроить панели инструментов, то следует выполнить:

Вид - Панели инструментов - Настройка

В окне запроса выбираются панели инструментов для постоянного отображения на экране.

Рабочее поле окна EXCEL - таблица. Сверху и слева от таблицы расположена рамка EXCEL с заголовками столбцов и строк. Имена столбцов - буквы латинского алфавита, имена строк - номера по порядку, таким образом, у каждой клетки есть адрес, например: A1, F34, -AN15 и т.д.

Клетка, выделенная прямоугольной рамкой, называется «Активной клеткой» или «Табличным курсором» - Активная клетка перемещается клавишами-стрелками или щелчком мыши.

- указатель мыши в рабочем поле. **Ноте** - перемещает Активную Клетку в начало строки; **Ctrl + Ноте** - в начало таблицы, в клетку A1; курсор имеет форму толстенького белого крестика.

Вся таблица - книга. В этой книге по умолчанию 3 листа. Количество листов можно уменьшить или увеличить практически без ограничений (до 255 листов). Номера листов обозначены на ярлычках под таблицей. Один лист - это 255 столбцов и 65580 строк.

Управление листами:

- **переход на другой лист** - щелчок мыши на ярлычке листа;
- **задать новое имя** - двойной щелчок мыши на ярлычке, задать на ярлычке новое имя с клавиатуры; (или из контекстного меню выполнить команду - **Переименовать**);
- **удалить** лист - из контекстного меню выполнить команду - **Удалить**;
- **добавить новые листы** - из контекстного меню выполнить команду - **Вставить**;

Листы можно перемещать, перетаскивая мышкой ярлычок, или копировать, перетаскивая мышкой при нажатии клавиши Ctrl. Между панелями инструментов и таблицей находится

Строка Формул. Эта строка устанавливается или убирается с экрана командой: **Вид - Строка Формул**.

Слева в Строке формул отображается адрес Активной клетки, а справа - содержимое Активной клетки в формульном виде, если эта информация - формула. Последняя строка экрана - строка состояния.

Виды информации в EXCEL:

3 основных вида информации в EXCEL:

Текстовая - эту информацию EXCEL различает самостоятельно. Числовое значение текстовой информации 0 или ошибка.

Числовая - это числа, целые или десятичные с разделителем десятичных знаков - запятая, например, 15,72.

Числа могут быть представлены в нормализованном виде (экспоненциальная форма числа). Этот формат называют ещё инженерным или научным, и используется он для представления очень больших или очень маленьких чисел, используя для этого степень десяти (экспоненту).

Например:

$$1200000000 = 1,2 * 10^9 = 1,2 + E9$$

$$0,0000000012 = 1,2 * 10^{-9} = 1,2 - E9$$

Формульная - всегда начинается с признака формулы, знака =. Без этого признака формула воспринимается как текст. Формулы могут содержать:

- числа,
- адресные ссылки (например: A1 + B1),

- текстовые константы, текст в кавычках, т.е. « текст». Используется для ввода текста в формулы.
- функции EXCEL. Большое разнообразие функций даст возможность решения самых различных классов задач, это в свою очередь и определяет такую популярность данного пакета программ.

Вот далеко не полный перечень только классов функций: - математические;

- статистические;
- логические;
- финансовые;
- календарные и другие.

Для записи (построения) формулы используются следующие арифметические операции:

- + сложение
- вычитание
- * умножение
- ./ деление

^ возведение в степень (например: A1^3),

% процент от числа или от адресной ссылки, используется со знаком умножения * (например: = 5%*A1);

() круглые скобки используются для изменения порядка вычислений. Стандартные правила порядка вычислений при расчёте формул EXCEL выполняет.

Если при вводе формулы допущена синтаксическая ошибка, то формула воспринимается как текст и выдаётся сообщение об ошибке. В формулах не допускаются пробелы.

Вид сообщений об ошибках:

ИМЯ? - в адресных ссылках формулы использованы русские буквы, или неверно записано имя функции.

#ЗНАЧ? - в формуле допущена адресная ссылка на клетку с текстом или с ошибкой.

#ССЫЛКА? - адресная ссылка на ошибку.

#ДЕЛ/О! - деление на 0.

В одной клетке таблицы может быть информация только одного вида, иначе она воспринимается как текст.

Ввод информации:

Информация всегда вводится в «Активную клетку», поэтому необходимо следить за её местоположением в таблице. Перед вводом информации Активную клетку необходимо установить в нужное место.

Размер информации в одной клетке таблицы ограничен до 255 символов. Если при вводе текст превышает размер клетки, то он автоматически переходит в клетки справа по строке, если они свободны. Если клетки справа заняты, то текст на экране обрывается, но при этом он полностью остаётся в оперативной памяти по адресу клетки ввода.

Информация при вводе отображается в активной клетке и в строке формул, чтобы её сбросить в процессе ввода, нужно нажать клавишу Esc. Информация считается введённой в указанный адрес только при завершении ввода: (Enter) - стандартный способ завершения ввода. Обязательно применяется при вводе и редактировании формул. После ввода «Активная клетка» автоматически переходит на одну клетку вниз.

Клавиши-стрелки - обычно завершают ввод исходных данных. После ввода «Активная клетка» автоматически перемещается в выбранном стрелкой направлении.

Щелчок мыши - используется тоже при вводе исходных данных, когда они разбросаны по таблице. «Активная клетка» перемещается по адресу щелчка мыши.

Если перед вводом щелкнуть мышкой в строке формул, то в ней появляется символный курсор, и информация вводится непосредственно в строку формул. При этом в

строке формул появляются дополнительные кнопки, которые можно использовать для редактирования, удаления или для ввода. В этом случае «Активная клетка» при вводе никуда не перемещается.

Редактирование информации:

Информация стирается из «Активной клетки» или выделенного блока клеток клавишей Del.

Если информация вводится в занятую клетку, то новая информация заменяет старую, таким образом, нет необходимости стирать старую информацию при вводе новых исходных данных.

Если в занятую клетку информация вводится ошибочно, то клавиша Esc стирает набираемую информацию, восстанавливая старую. Для редактирования данных в клетке таблицы необходимо включить режим редактирования, который вызывается двойным щелчком мыши в клетке редактирования или клавишей F2: в клетке появляется текстовый курсор, который можно перемещать по информации в клетке и затем редактировать (удалять, вставлять или заменять символы).

Щелчок мыши в строке формул также вызывает режим редактирования информации Активной клетки, символьной курсор появляется прямо в строке формул, где и отображается процесс редактирования. Редактирование завершается клавишей Enter.

Выделение в таблице:

Практически все операции в EXCEL выполняются для выделенного блока клеток или только для «Активной клетки».

Основные приёмы выделения:

- с клавиатуры - Shift + стрелки управления курсором;
- мышкой - перетаскиванием по нужному блоку клеток.

Дополнительные приёмы:

- **выделение столбца** - щелчок мыши на букве столбца в рамке таблицы, перетаскиванием мышки по буквам столбцов в рамке можно выделить несколько смежных столбцов;
- **выделение строки** - щелчок мыши на номере строки в рамке таблицы, перетаскиванием мышки по номерам строк можно выделить несколько смежных строк в таблице;
- **выделение всей таблицы** - щелчок мыши в левом верхнем углу рамки таблицы;
- **выделение таблицы пользователя** - поместить «Активную клетку» в A1 и нажать клавиши Shift + Ctrl + End;
- **выделение разрывного блока клеток** - EXCEL допускает выделение несмежных между собой блоков клеток, для этого выделить мышкой нужные блоки при нажатой клавише Ctrl. В выделенном блоке остаётся не закрашенной Активная клетка.

Перемещение и копирование мышкой:

- выделить блок клеток;
- установить указатель мыши строго на рамку блока или Активной клетки;
- для перемещения - перетащить мышкой блок в другое место таблицы;
- для копирования - перетащить мышкой при нажатой клавише

Ctrl. Эту клавишу отпустить после выполнения операции в последнюю очередь.

Если блок клеток перемещается или копируется в занятое место таблицы, то на экране появляется окно-предупреждение, что будет произведена замена информации. Если эта замена нежелательна, то надо отказаться от выполнения операции.

Использование некоторых функций EXCEL:

Возможности электронных таблиц значительно расширяются, если использовать функции. Все функции EXCEL можно просмотреть, если вызвать окно «Мастер функций». Это окно вызывается кнопкой fx на стандартной панели инструментов. В этом окне слева представлен список категорий (видов) функций, а справа - список функций выбранной категории. Общий вид функций, выбранной щелчком мыши, и краткая подсказка по ней отображается внизу окна. Чтобы получить подробную инструкцию по её применению

надо нажать кнопку с вопросом (или кнопку СПРАВКА в EXCEL-7).

Окно «Мастер функций» можно использовать при вводе сложных или незнакомых функций, тогда в режиме «шаг за шагом» вводится сначала имя выбранной функции, а затем её аргументы.

1.3.3 Уравнение Клосса

Уравнение механической характеристики АД записывается следующим образом:

$$M = \frac{2M_{\text{макс}}(1+aS_{\text{кр}})}{\frac{s}{S_{\text{кр}}} + \frac{S_{\text{кр}}}{s} + 2a \cdot S_{\text{кр}}} \quad (1.16)$$

Где $M_{\text{макс}}$ - максимальный (критический) момент электродвигателя, Н·м;

$S_{\text{кр}}$ - критическое скольжение, соответствующее критическому моменту, о.е.

$$2a = \frac{R_1^I}{R_2^{II}}$$

Задача 1.2. Для асинхронного электродвигателя с к.з. ротором типа АНР100L6, имеющего следующие паспортные данные:

$P_n = 2.2\text{ кВт}$; $n_n = 945\text{ об/мин}$; $n_c = 1000\text{ об/мин}$; $\mu_{\text{кр}} = 2.2$; $R_1^I = 0.09$; $R_2^{II} = 0.067$; построить естественную механическую характеристику по уравнению Клосса при помощи персонального компьютера.

Решение:

1. Составляем блок-схему алгоритма расчёта координат для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя к.з. ротором типа АИР100L6 (рисунок 1.3).
2. Составляем инструкцию по заполнению электронной таблицы EXCEL для реализации вычислительного алгоритма расчёта координат для построения естественной механической характеристики АД с к.з. ротором типа АНР100L6.
3. Заполняем электронную таблицу EXCEL согласно инструкции и получаем механическую характеристику $M = f(S)$ для электродвигателя типа АИР100L6 (рисунок 1.4).

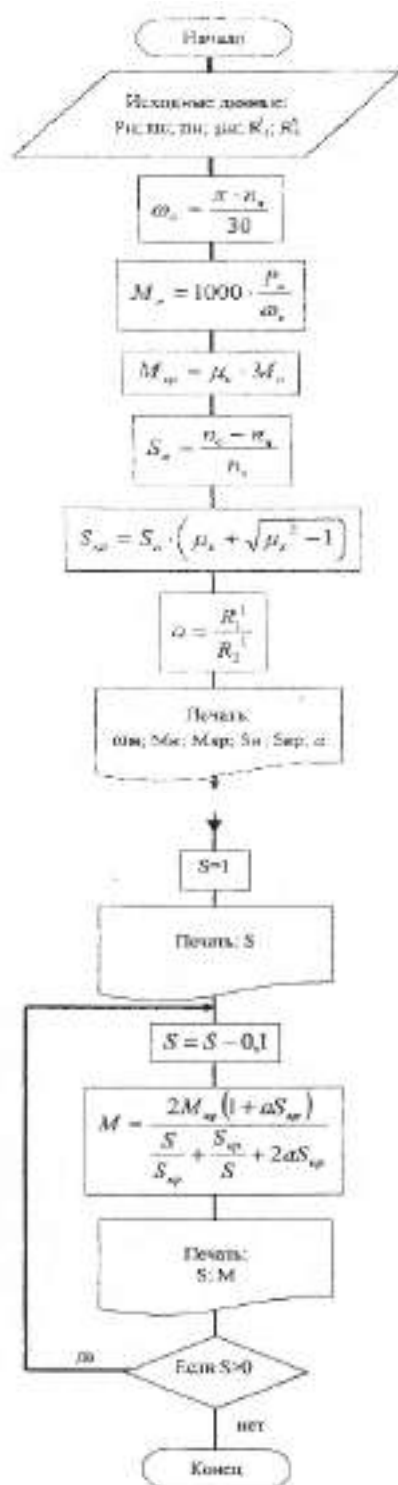


Рисунок 1.3 Блок-схема алгоритма расчета координат для построения естественной механической характеристики асинхронного двигателя с к.з. ротором

Таблица 1.2

Инструкция по заполнению электронной таблицы EXCEL для реализации вычислительного алгоритма определения координат для построения естественной механической характеристики асинхронного двигателя с к.з. ротором

Ячейка	Значение
A1 (A1-G1)	"Построение механической характеристики"
A2 (A2-G2)	"асинхронного электродвигателя с к.з. "
A3 (A3-G3)	"ротором по уравнению Клосса"
B6 (B6-E6)	"Исходные данные"
A8	"Тип двигателя"
B8	" P_H , кВт"
C8	" n_c , об/мин"
D8	" n_H об/мин"
E8	" μ_K "
F8	" R_1^I "
G8	" R_2^{II} "
B12 (B 12-E 12)	"Промежуточные расчеты"
B14	" ω_H , рад/с"
C14	" M_H , Н*м"
D14	" $M_{кр}$, Н*м"
E14	" S_H "
F14	" $S_{кр}$ "
G14	"а"
B15	$=3,14 \cdot D9/30$
C15	$=1000 \cdot B9/B15$
D15	$=E9 \cdot C15$
E15	$=(C9-D9)/C9$
F15	$=E15 \cdot (E9 + \text{КОРЕНЬ}(\text{СТЕПЕНЬ}(E9;2)-1))$
G15	$=F9/G9$
A18 (A18-D18)	"Данные для построения"
A1 9 (A19-D19)	"механической характеристики:"
A21	"S"
B21	"M, Н*м"
A22	=0
B22	=0
A23	=A24-0,1
B23	$=2 \cdot D15 \cdot (1 + G15 \cdot F15) / (A23/F15 + F15/A23 + 2 \cdot G15 \cdot F15)$
A24	=A25-0,1
B24	$=2 \cdot D15 \cdot (1 + G15 \cdot F15 \cdot V(A24/F15 + F15/A24 + 2 \cdot G15 \cdot F15))$
A25	=A26-0,1
B25	$=2 \cdot D15 \cdot (1 + G15 \cdot F15) / (A25/F15 + F15/A25 + 2 \cdot G15 \cdot F15)$
A26	=A27-0,1
B26	$=2 \cdot D15 \cdot (1 + G15 \cdot F15) / (A26/F15 + F15/A26 + 2 \cdot G15 \cdot F15)$
A27	=A28-0,1
B27	$=2 \cdot D15 \cdot (1 + G15 \cdot F15) / (A27/F15 + F15/A27 + 2 \cdot G15 \cdot F15)$
A28	=A29-0,1
B28	$=2 \cdot D15 \cdot (1 + G15 \cdot F15) / (A28/F15 + F15/A28 + 2 \cdot G15 \cdot F15)$
A29	=A30-0,1
B29	$=2 \cdot D15 \cdot (1 + G15 \cdot F15) / (A29/F15 + F15/A29 + 2 \cdot G15 \cdot F15)$
A30	=A31-0,1
B30	$=2 \cdot D15 \cdot (1 + G15 \cdot F15) / (A30/F15 + F15/A30 + 2 \cdot G15 \cdot F15)$
A31	=A32-0,1
B31	$=2 \cdot D15 \cdot (1 + G15 \cdot F15) / (A31/F15 + F15/A31 + 2 \cdot G15 \cdot F15)$
A32	=1
B32	$=2 \cdot D15 \cdot (1 + G15 \cdot F15) / (A32/F15 + F15/A32 + 2 \cdot G15 \cdot F15)$

B37 (B37-G37) (B40-G40)	"Рисунок 1.4. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя с к.з. ротором"
Объект	=ВНЕДРИТЬ("диаграмма Microsoft Graph")="M(S)" Значения X: "=Лист1!\$A\$22:\$A\$32" Значения Y: " =Лист1!\$B\$22:\$B\$32"

Построение механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по уравнению Клосса

Ф.И.О.	группа, курс
Иванов Иван Иванович	1,1

Исходные данные:

Тип двигателя	P_n , кВт	n_c об/мин	n_c об/мин	μ_k	R_1^I	R_2^{II}
АНР100L6	2,2	1000	945	2,2	0,09	0,067

Промежуточные расчеты:

ω_n , рад/с	M_n , Н*м	$M_{кр}$, Н*м	S_n	$S_{кр}$	a
98,91	22,242443	48,933374	0,055	0,2288	1,3433

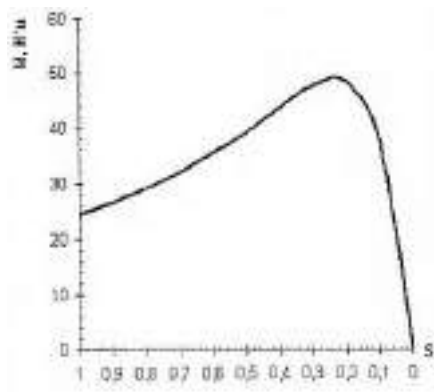


Рисунок 1.4 Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя с к.з. ротором

Данные для построения механической характеристики

s	M, Н-м
0	0
0,1	38,31178
0,2	48,59697
0,3	47,58817
0,4	43,59209
0,5	39,27374
0,6	35,35732
0,7	31,97609
0,8	29,09473

0,9	26,63928
1	24,53608

2. Асинхронный электродвигатель с фазным ротором

2.1 Назначение электродвигателей

Асинхронные электродвигатели с фазным ротором применяются при тяжёлых условиях пуска, а также при необходимости плавного регулирования частоты вращения вниз от номинальной. Они используются для рабочих машин, требующих большой пусковой момент. Двигатели с фазным ротором являются модификацией АД с короткозамкнутым ротором. Главным достоинством таких АД - возможность пуска при малых пусковых токах, что особенно важно для работы от слабых сетей. Кроме того, фазный АД можно регулировать по частоте вращения, вводя в ротор резистор. В ряде случаев фазные асинхронные электродвигатели работают в режиме генератора, как нагружающие устройства. Иногда они используются в асинхронном вентильном каскаде, допускающем плавную регулировку частоты вращения в широком диапазоне при высоком коэффициенте мощности.

Выводные концы обмотки ротора, соединённой обычно в звезду, подключены к трём контактными кольцам. С помощью щёток через кольца в цепь обмотки ротора можно вводить добавочный резистор или добавочную ЭДС для изменения пусковых или рабочих свойств электродвигателя. Щётки позволяют также замкнуть обмотку накоротко.

В большинстве случаев добавочный резистор вводится в обмотку ротора только для облегчения пуска АД, так как в этом случае увеличивается момент и уменьшается ток. При работе АД пусковой резистор должен быть полностью выведен, а обмотка ротора замкнута накоротко.

Двигатели с фазным ротором выполняются с теми же степенями защиты, что и АД с короткозамкнутым ротором, -IP54 (IP44) и IP23 по СТ СЭВ 247-76.

В серии АИ на базе вариантов АИР, АИС, АИРН, АИСН разработаны соответственно следующие модификации АД с фазным ротором: **АИРФ** - со степенью защиты IP54 (IP44); **АИСФ** - со степенью защиты IP54 (IP44); **АИРНФ** - со степенью защиты IP23; **АИСНФ** -со степенью защиты IP23.

2.2 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором

Асинхронный электродвигатель с фазным ротором характеризуется номинальными техническими данными, которые указываются в каталоге:

$P_n, \text{кВт}$ -номинальная мощность; $U_n, \text{В}$ - номинальное напряжение; $n_n, \text{об/мин}$ - номинальная частота вращения вала электродвигателя (или S_n -номинальное скольжение); $I_n, \text{А}$ —номинальный ток; $f_n, \text{Гц}$ -частота питающей сети; $\cos\varphi_n$ -коэффициент мощности при номинальной нагрузке; η_n -номинальный коэффициент полезного действия; $n_c, \text{об/мин}$ - синхронная частота вращения (частота вращения магнитного поля статора); $\mu_n = \frac{M_{\text{макс}}}{M_n}$ кратность максимального (или критического момента); $I_{2n}, \text{А}$ -номинальный ток обмотки фазы ротора; $E_{2n}, \text{В}$ - э.д.с. номинальная ротора (линейное напряжение на кольцах разомкнутой цепи неподвижного ротора).

Естественную механическую характеристику асинхронного двигателя с фазным ротором $\omega = f(M)$ ориентировочно можно построить, используя его данные по каталогу по 3 -м характерным точкам: А; В; С, координаты которых рассчитываются аналогично координатам точек для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором (см. п.п. 1.2.). Пусковой момент (M_1) рассчитывается

при введённом пусковом сопротивлении в цепи ротора согласно законов коммутации по формуле:

$$M_1 = (0,8 \dots 0,85)M_{\text{макс}} \quad (2.1)$$

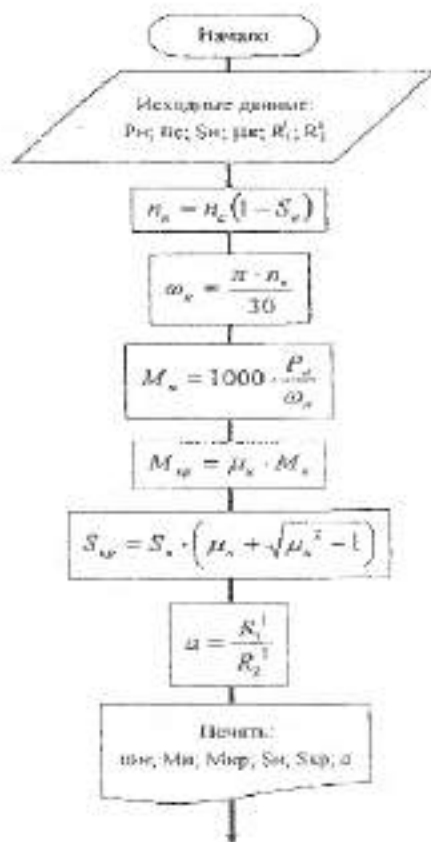
Естественную механическую характеристику асинхронного электродвигателя с фазным ротором можно построить по уравнению Клосса по формуле (1.16), задаваясь скольжением в пределах от $S=0$ до $1 > S > S_{\text{кр}}$

Задача 2.1. Для асинхронного электродвигателя с к.з. ротором типа АИРФ200М4, имеющего следующие паспортные данные:

$P_n = 22\text{кВт}$; $n_c = 1500$ об/мин; $S_n = 0.025$; $\mu_{\text{кр}} = 2,2$; Параметры схемы замещения $R_1^I = 0.024$; $R_2^{II} = 0.026$; построить естественную механическую характеристику по уравнению Клосса при помощи персонального компьютера.

Решение:

1. Составляем блок-схему алгоритма расчёта координат для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя к.з. ротором типа АИРФ200М4 (рисунок 2.1).
2. Составляем инструкцию по заполнению электронной таблицы EXCEL для реализации вычислительного алгоритма расчёта координат для построения естественной механической характеристики АД с к.з. ротором типа АИРФ200М4.
3. Заполняем электронную таблицу EXCEL согласно инструкции и получаем механическую характеристику $M = f(S)$ для электродвигателя типа АИРФ200М4 (рисунок 2.2).



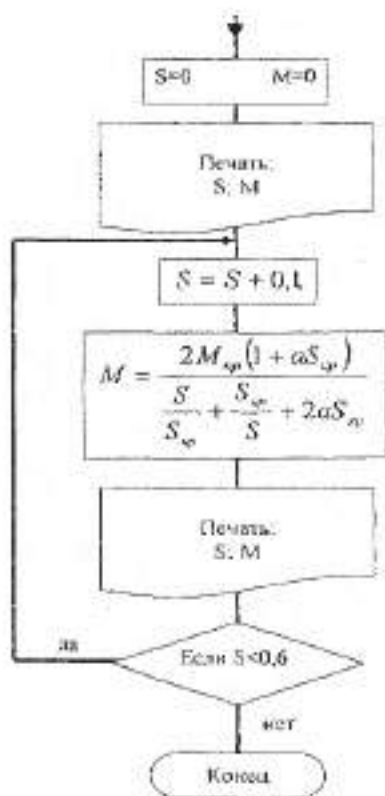


Рисунок 2.1 Блок-схема алгоритма расчета координат для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором

Таблица 2.1

Инструкция по заполнению электронной таблицы EXCEL для реализации вычислительного алгоритма определения координат для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором

Ячейка	Значение
A1 (A1-G1)	"Построение механической характеристики"
A2 (A2-G2)	"асинхронного электродвигателя с фазным ⁷
A3 (A3-G3)	"ротором по уравнению Клосса"
B6 (B6-E6)	"Исходные данные"
A8	"Тип двигателя"
B8	"P _н , кВт"
C8	"n _с , об/мин"
D8	"S _н о.е."
E8	"μ _к "
F8	"R ₁ ^I "
G8	"R ₂ ^{II} "
B12 (B12-E12)	"Промежуточные расчеты"
B14	"n _н об/мин"
C14	"ω _н , рад/с"
D14	"M _н , Н*м"
E14	"M _{кр} , Н*м"
F14	"S _{кр} "

G14	"a"
B15	=C9*(1-D9)
C15	=3.14*B15/30
D15	=1000*B9/C15
E15	=E9*D15
F15	=09*(E9+КОРЕНЬ(СТЕПЕНЬ(E9;2)-1))
G15	=F9/G9
A18 (A18-D15)	"Данные для построения"
A19 (A19-D19)	"механической характеристики:"
A21	"S"
B21	"M, H·м"
A22	=0
B22	=0
A23	=A22+0,1
B23	=2*E15*(1+G15*F15)/(A23/F15+F15/A23+2*G15*F15)
A24	=A 23+0,1
B24	=2*E15*(1+G15*F15)/(A24/F15+F15/A24+2*G15*F15)
A25	=A24+0,1
B25	=2*E15*(1+G15*F15)/(A25/F15+F15/A25+2*G15*F15)
A26	=A25+0,1
B 26	=2*E 15 *(1 +G15*F 15)/(A26/F 15+F 15/A26+2*G 15*F 15)
A27	=A26+0,1
B27	=2*E15*(1+G15*F15)/(A27/F15+F15/A27+2*G15*F15)
A28	=A27+0,1
B28	=2*E 15*(1 +G15 * F15)/(A2 8/F15+F15/A28+2*G1 5*F 15)
(B37-G37) (B40-G40)	"Рисунок 2.2 Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором"
Объект 13	=ВНЕДРИТЬ ("MSGraph.Chart.8";"

Построение механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором по уравнению Клосса

Исходные данные:

Тип двигателя	P _н , кВт	n _c об/мин	S _н , о.е.	μ _к	R ₁ ^I	R ₂ ^{II}
АИРФ200М4	22	1500.	0,025	2,5	0,024	0,026

Промежуточные расчеты:

n _н , об/мин	ω _н , рад/с	M _н , Н*м	M _{кр} , Н*м	S _{кр}	a
1462,50	153,08	143,72	359,30	0,12	0,92

Данные для построения механической характеристики:

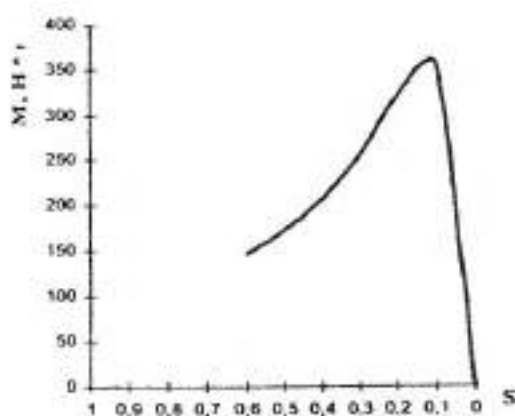


Рисунок 2.2 Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя с фазным ротором

S	M, Нм
0	0
0,1	354,09
0,2	320,54
0,3	255,38
0,4	206,75
0,5	172,18
0,6	146,98

2.3 Определение количества и величины секций пускового резистора АД с фазным ротором

Асинхронный электродвигатель с фазным ротором запускается при полностью введённом пусковом резисторе (реостате), который состоит из секций. Пусковой реостат служит для ограничения пускового тока АД с фазным ротором. Определить количество и величины сопротивлений секций пускового реостата можно графическим и аналитическим способами.

Графический метод:

Для определения количества и величины сопротивлений секций пускового реостата необходимо построить пусковую диаграмму АД с фазным ротором (рисунок 2.3).

1. Строим механическую характеристику АД с фазным ротором по 3-м точкам или по уравнению Клосса;
2. Определяем искусственный пусковой момент M_1 Н·м, согласно законов коммутации:

$$M_1 = (0,8 \dots 0,85)M_{\text{макс}} \quad (2.2)$$

3. Определяем момент переключения M_2 , Н·м, секций пускового реостата:

$$M_2 = (1 \dots 1,5)M_n \quad (2.3)$$

4. Строим прямые $M = M_1$ и $M = M_2$;
5. Соединяем точку 1 и точку А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 2, из точки 2 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 3; соединяем точку 3 с точкой А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 4, из точки 4 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 5; соединяем точку 5 с точкой А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 6, из точки 6 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обознача-

ем эту точку цифрой 7.

(Цифра 7 обязательно должна находиться на пересечении естественной механической характеристики АД и прямой $M = M_1$ -это может быть достигнуто путём подбора коэффициентов от 1 до 1,5 у момента переключения M_2 и коэффициентов от 0,8 до 0,85 у пускового момента M_1).

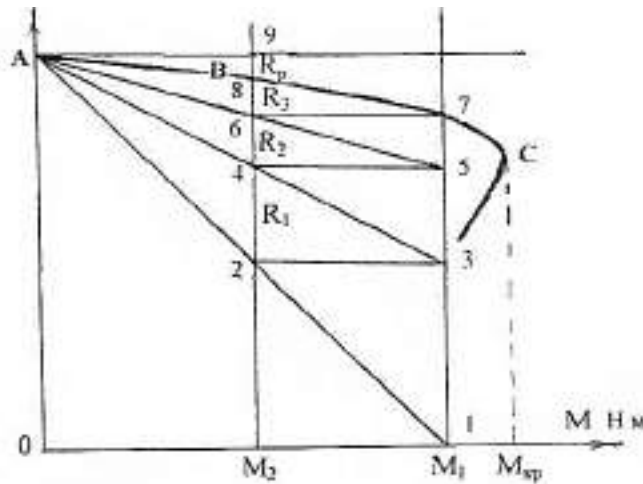


Рисунок 2.3 - Пусковая диаграмма АД с фазным ротором

6. Проводим прямую $CO = C0_c$ параллельную оси моментов и обозначаем точку пересечения с прямой $M = M_2$ цифрой 9, а точку пересечения механической характеристики с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 8. По пусковой диаграмме определяем количество ступеней пускового реостата (m). Согласно рисунка 2.3. $m = 3$

пределяем номинальное активное сопротивление $R_{2н}$. Ом, обмотки фазы ротора:

$$R_{2н} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}} \quad (2.4)$$

где $E_{2н}$ - Э.Д.С. номинальная ротора, В, $I_{2н}$ - номинальный ток обмотки фазы ротора, А.

7. Определяем активное сопротивление R_p , Ом, обмотки фазы ротора при $M_c = M_n$:

$$R_p = R_{2н} \cdot S_n \quad (2.5)$$

8. Определяем масштаб сопротивлений m_R , Ом/мм, замеряем расстояние отрезка (8 - 9) в мм:

$$m_R = \frac{R_p}{(8-9)} \quad (2.6)$$

9. Определяем величину сопротивления первой секции R_1 ?Ом, пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (2-4) в мм.

$$R_1 = m_R \cdot (2 - 4) \quad (2.7)$$

10. Определяем величину сопротивления второй секции R_2 , Ом, пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (4 - 6) в мм.

$$R_2 = m_R \cdot (4 - 6) \quad (2.8)$$

11. Определяем величину сопротивления третьей секции R_3 , Ом, пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (6 - 8) в мм.

$$R_3 = m_R \cdot (6 - 8) \quad (2.9)$$

12. Определяем суммарное сопротивление роторной цепи R_n , Ом, при полностью введённом пусковом реостате:

$$R_n = \Sigma R = R_p + R_1 + R_2 + R_3 \quad (2.10)$$

Аналитический метод:

Так как стоит задача определить число и величину сопротивлений ступеней пускового реостата, следовательно, задаются M_1 и M_2 .

1. Задаёмся $M_1 = (0,8 \dots 0,85)M_{\text{макс}}$, $M_2 = (1 \dots 1,5)M_n$
2. Определяем номинальное активное сопротивление $R_{2н}$. Ом, обмотки фазы ротора:

$$R_{2н} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}} \quad (2.11)$$

3. Определяем активное сопротивление R_p , Ом, обмотки фазы ротора при $M_c = M_n$:

$$R_p = R_{2н} \cdot S_n \quad (2.12)$$

4. Определяем колебания момента при пуске:

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2} \quad (2.13)$$

5. Определяем количество ступеней пускового реостата:

$$m = \frac{\lg \frac{M_n R_{2н}}{R_p M_1}}{\lg \lambda} \quad (2.14)$$

6. Принимаем m целым числом:
7. Рассчитываем уточнённое значение λ

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_{2н} M_n}{R_p M_1}} \quad (2.15)$$

8. Определяем величины сопротивлений секций пускового реостата:

$$R_m = R_p (\lambda - 1) \quad (2.16)$$

$$R_{m-1} = R_p \cdot \lambda (\lambda - 1) = R_m \cdot \lambda \quad (2.17)$$

$$R_1 = R_p \cdot \lambda^{m-1} (\lambda - 1) = R_2 \cdot \lambda \quad (2.18)$$

9. Определяем суммарное сопротивление роторной цепи R_n , Ом, при полностью введённом пусковом реостате:

$$R_n = \Sigma R = R_p + R_1 + R_2 + R_m \quad (2.19)$$

Задача 2.2. Определить число и величины сопротивлений секций пускового реостата для АД с фазным ротором типа АИРФ200М4, имеющего следующие паспортные данные:

$P_n = 22 \text{ кВт}$; $n_c = 1500 \text{ об/мин}$; $S_n = 2,5\%$; $\mu_{кр} = 2,5$; Данные ротора: $E_{2n} = 340 \text{ В}$, $I_{2n} = 45 \text{ А}$.

Графический метод:

1. Строим естественную механическую характеристику АД типа АИРФ200М4 по 3-м характерным точкам: А; В; С. (рисунок 2.4).

2. Рассчитываем координаты точек:

- определяем синхронную скорость вращения:

$$\omega_c = \frac{\pi \cdot n_c}{30} \quad (2.20)$$

$$\omega_c = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

3. Определяем номинальную частоту вращения:

$$n_n = n_c(1 - S_n) \quad (2.21)$$

$$n_n = 1500(1 - 0,025) = 1462,5 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

4. Определяем номинальную скорость вращения ω_n , рад/с, электродвигателя

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} \quad (2.22)$$

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 1462,5}{30} = 153 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

5. Определяем номинальный момент M_n , Н · м, электродвигателя:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \cdot 10^3 \quad (2.23)$$

$$M_n = \frac{22}{153} \cdot 10^3 = 143,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

6. Определяем максимальный (критический) момент $M_{\text{макс}}$, Н · м. электродвигателя:

$$M_{\text{макс}} = \mu_{кр} \cdot M_n; \quad (2.24)$$

$$M_{\text{макс}} = 2,5 \cdot 143,7 = 359,25 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

7. Определяем критическое скольжение $S_{кр}$, о.е., по формуле:

$$S_{кр} = S_n \cdot (\mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}^2 - 1}) \quad (2.25)$$

$$S_{кр} = 0,025 \cdot \left(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1} \right) = 0.12$$

8. Определяем критическую скорость вращения $\omega_{кр}$, рад/с, электродвигателя:

$$\omega_{кр} = \omega_c(1 - S_{кр}) \quad (2.26)$$

$$\omega_{кр} = 157(1 - 0.12) = 138,2 \text{ рад/с}$$

9. Определяем пусковой момент M_1 , Н·м, электродвигателя:

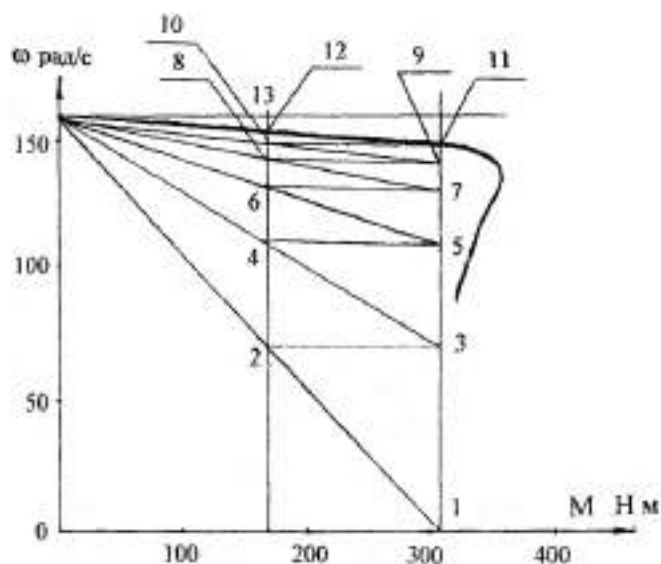
$$M_1 = 0,85 \cdot M_{кр} \quad (2.27)$$

$$M_1 = 0,85 \cdot 359,25 = 305,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

10. Определяем момент переключения M_2 , Н·м, электродвигателя:

$$M_2 = (1 \dots 1,5) M_H; \quad (2.28)$$

$$M_2 = 1,17 \cdot 143,7 = 168 \text{ Н} \cdot \text{м};$$



11. Определяем номинальное активное сопротивление R_{2H} , Ом, обмотки фазы ротора:

$$R_{2H} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}}; \quad (2.29)$$

$$R_{2H} = \frac{340}{1,73 \cdot 45} = 4,6 \text{ Ом};$$

12. Определяем активное сопротивление R_p , Ом, обмотки фазы ротора при $M_c = M_H$:

$$R_p = R_{2H} \cdot S_H; \quad (2.30)$$

$$R_p = 4,36 \cdot 0,025 = 0,1 \text{ Ом};$$

13. Определяем масштаб m_R , Ом/мм, сопротивлений:

$$m_R = \frac{R_p}{(12-13)}; \quad (2.31)$$

$$m_R = \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ Ом};$$

14. Определяем величину сопротивления первой секции R_1 , Ом, пускового реостата:

$$R_1 = m_R \cdot (2 - 4); \quad (2.32)$$

$$R_1 = 0,05 \cdot 19 = 0,95 \text{ Ом};$$

15. Определяем величину сопротивления второй секции R_2 , Ом, пускового рео-

стата:

$$R_2 = m_R \cdot (4 - 6); \quad (2.33)$$
$$R_2 = 0,05 \cdot 11 = 0,5 \text{ Ом};$$

16. Определяем величину сопротивления третьей секции R_3 , Ом, пускового реостата:

$$R_3 = m_R \cdot (6 - 8); \quad (2.34)$$
$$R_3 = 0,05 \cdot 5 = 0,25 \text{ Ом};$$

17. Определяем величину сопротивления четвёртой секции R_4 , Ом, пускового реостата:

$$R_4 = m_R \cdot (8 - 10); \quad (2.35)$$
$$R_4 = 0,05 \cdot 3 = 0,15 \text{ Ом};$$

18. Определяем величину сопротивления пятой секции R_5 , Ом, пускового реостата:

$$R_5 = m_R \cdot (10 - 12); \quad (2.36)$$
$$R_5 = 0,05 \cdot 2 = 0,1 \text{ Ом};$$

19. Определяем суммарное сопротивление R_n , Ом, роторной цепи при полностью введённом пусковом реостате:

$$R_n = \Sigma R = R_p + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5; \quad (2.37)$$
$$R_n = \Sigma R = 0,1 + 0,95 + 0,5 + 0,25 + 0,15 + 0,1 = 2,05 \text{ Ом};$$

Аналитический метод:

1. Дано: $M_1 = 305,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_2 = 168 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_H = 143,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $R_p = 0,1 \text{ Ом}$; $R_{2H} = 4,36 \text{ Ом}$;

2. Определяем колебания момента при пуске:

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2}; \quad (2.38)$$
$$\lambda = \frac{305,4}{168} = 1,82;$$

3. Определяем количество ступеней пускового реостата:

$$m = \frac{\lg \frac{M_H R_{2H}}{R_p M_1}}{\lg \lambda} \quad (2.39)$$

$$m = \frac{\lg \frac{143,7}{0,1} \frac{4,36}{305,4}}{\lg 1,82} = \frac{1,31}{0,26} = 5,03$$

4. Принимаем m целым числом: $m=5$

5. Рассчитываем уточнённое значение λ

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_{2H} M_H}{R_p M_1}} \quad (2.40)$$

$$\lambda = \sqrt[5]{\frac{143,7 \cdot 4,36}{0,1 \cdot 305,4}} = 1,83$$

6. Определяем величины сопротивлений секций пускового реостата:

$$R_5 = R_p(\lambda - 1); \quad (2.41)$$

$$R_5 = 0,1(1,83 - 1) = 0,083 \text{ Ом};$$

$$R_4 = R_5 \cdot \lambda; \quad (2.42)$$

$$R_4 = 0,083 \cdot 1,83 = 0,15 \text{ Ом};$$

$$R_3 = R_4 \cdot \lambda; \quad (2.43)$$

$$R_3 = 0,15 \cdot 1,83 = 0,27 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_3 \cdot \lambda; \quad (2.44)$$

$$R_2 = 0,27 \cdot 1,83 = 0,49 \text{ Ом};$$

$$R_1 = R_2 \cdot \lambda; \quad (2.45)$$

$$R_1 = 0,49 \cdot 1,83 = 0,896 \text{ Ом};$$

7. Определяем суммарное сопротивление роторной цепи R_N , Ом, при полностью введенном пусковом реостате:

$$R_n = \Sigma R = R_p + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5; \quad (2.46)$$

$$R_n = \Sigma R = 0,1 + 0,896 + 0,49 + 0,27 + 0,15 + 0,083 = 1,989 \text{ Ом}.$$

Примечание:

Расхождение значений величин секций пускового реостата, полученных графическим методом и аналитическим объясняются тем, что аналитический метод предполагает, что рабочая часть механической характеристики АД с фазным ротором представляет собой прямую линию.

Рабочая часть механической характеристики АД с фазным ротором построенная по уравнению Клосса максимально приближена к прямой линии, поэтому и величины сопротивлений секций пускового реостата полученные графическим методом максимально приближены к величинам сопротивлений, рассчитанных аналитическим методом.

3.1 Электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения

3.2 Обозначение ДПТ серии 4П

Двигатели постоянного тока стоят в 3 – 5 раз дороже, чем асинхронные короткозамкнутые двигатели, и требуют больших расходов на обслуживание. Поэтому они находят применение в тех случаях, когда их особые свойства (широкие пределы регулирования частоты вращения и возможность получения специальных механических характеристик) играют решающее значение. Постоянный ток для питания ДПТ получается с помощью генераторов постоянного тока или выпрямительных установок, преобразующих переменный ток в постоянный.

Двигатели постоянного тока серии 4П с высотами оси вращения 80, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 355, 450 мм с номинальными вращающими моментами от 1,2 до 15000 Н*м предназначены для регулируемых электроприводов, питаемых как от полупроводниковых преобразователей, так и от иных источников питания (генераторов, аккумуляторных батарей). Электродвигатели изготавливаются для различных отраслей народного хозяйства климатических исполнений УХЛ4, 04 по ГОСТ 15150-69 и для поставки на экспорт в страны с умеренным и тропическим климатом.

Структура условного обозначения:

3.3 П X₁ М С X₂X₃X₄ X₅ X₆ X₇ X₈X₉

3.4 – порядковый номер серии;

П – наименование вида двигателя – постоянного тока;

X₁ – исполнение по степени защиты и способу охлаждения:

(О – закрытое с наружным обдувом от вентилятора на валу двигателя IP44, IC0141;

Н-защищённое с самовентиляцией IP23, IC01;

Ф – защищённое с независимой вентиляцией от постороннего источника;

П-закрытое продуваемое от постороннего источника);

М – модификация;

С – смешанное возбуждение; отсутствие буквы С указывает на параллельное или независимое возбуждение;

X₂ X₃ X₄ – высота оси вращения;

X₅ – условная длина корпуса по МЭК 72 – I;

X₆ – условная длина сердечника якоря (1 – первая длина; 2 – вторая длина). Отсутствие цифры означает совпадение количества длин якорей и корпусов;

X₇ – наличие тахогенератора: Г – с тахогенератором; отсутствие буквы – без тахогенератора;

X₈ – климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69;

X₉ – категория размещения по ГОСТ 15543-70.

3.5 Основные формулы, используемые при решении задач

Уравнение электрического равновесия цепи якоря электродвигателя постоянного тока (ДПТ) записывается следующим образом:

$$U = E + I \cdot R = K \cdot \Phi \cdot \omega + 1(R_{\text{я}} + R_{\text{д}}); \quad (3.1)$$

где U – напряжение, приложенное к цепи ДПТ, В.

E – ЭДС, наведённая в обмотке якоря ДПТ, В;

I – ток в цепи якоря ДПТ, А;

R – общее сопротивление цепи якоря. Ом;

K – безразмерный коэффициент, определяемый конструктивными параметрами электродвигателя;

Φ – магнитный поток ДПТ, Вб;

ω – угловая скорость вращения якоря ДПТ, рад/с;

R_я – сопротивление добавочного резистора, включаемого последовательно в цепь якоря, Ом;

R_д – внутреннее сопротивление цепи якоря ДПТ, состоящее из сопротивлений последовательно соединённых обмоток якоря r_{оя}, дополнительных полюсов r_{дп} и компенсационной обмотки r_{ко}, щётчного контакта r_щ, а также сопротивления последовательной обмотки возбуждения r_{ов} (для ДПП последовательного возбуждения);

Внутреннее сопротивление цепи якоря R, Ом, ДПТ с независимым возбуждением рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{я}} \approx 0,5(1 - \eta_{\text{н}}) \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = 0,5(1 - \eta_{\text{н}}) R_{\text{н}}; \quad (3.2)$$

Где η_н, U_н, I_н, R_н – соответственно номинальные КПД, напряжение, В, ток, А, и сопротивление, Ом.

Электродвижущая сила E_н, В, (ЭДС), наведённая в обмотке ДПТ при номинальной скорости вращения ω_н и номинальном магнитном потоке Φ_н рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{н}} = C_{\text{н}} \cdot \omega_{\text{н}} = U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}} = U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{я}}; \quad (3.3)$$

где C_H - коэффициент пропорциональности между ЭДС и скоростью вращения, а также между электромагнитным моментом и током якоря в ДПТ при неизменном магнитном потоке возбуждения Φ_H .

Номинальный электромагнитный вращающий момент $M_{эH}$, Н·м, ДПТ рассчитывается по формуле:

$$M_{эH} = K \cdot \Phi_H \cdot I_H = C_H \cdot I_H = M_H + M_{xx} \quad (3.4)$$

где M_H - номинальный вращающий момент на валу электродвигателя, Н·м;

M_{xx} - момент холостого хода (момент потерь) двигателя Н·м.

Этот момент (M_{xx}) мал относительно момента на валу электродвигателя, поэтому в приближённых расчётах им можно пренебречь и считать, что момент на валу двигателя равен его электромагнитному моменту.

Уравнение электромеханической характеристики ДПТ независимого возбуждения (параллельного) записывается следующим образом:

$$\omega = \frac{U - I \cdot R}{C} = \omega_0 - \Delta\omega \quad (3.5)$$

где ω_0 — скорость якоря при идеальном холостом ходе ДПТ, рад/с; $\Delta\omega$ - статическое падение скорости якоря, рад/с.

Уравнение механической характеристики ДПТ независимого возбуждения записывается следующим образом:

$$\omega = \frac{U}{C} - \frac{M \cdot R}{C^2} = \omega_0 - \Delta\omega \quad (3.6)$$

где M - вращающий момент на валу двигателя, Н·м;

Мощность, потребляемая двигателем из электрической сети $P_{эH}$, Вт, при номинальной нагрузке:

$$P_{эH} = U_H \cdot I_H = \frac{P_H}{\eta_H} = \frac{M_H \cdot \omega_H}{\eta_H} \quad (3.7)$$

где P_H - номинальная механическая мощность на валу электродвигателя, Вт;

ω_H - номинальная скорость вращения якоря, рад/с;

η_H - номинальная частота вращения электродвигателя, об/мин.

Номинальный вращающий момент M_H Н·м, на валу электродвигателя:

$$M_H = 1000 \frac{P_H}{\omega_H} = 9550 \frac{P_H}{n_H} \quad (3.8)$$

Скорость вращения идеального холостого хода ω_0 , рад/с:

$$\omega_0 = \frac{U_H}{C_H} = \frac{\omega_H \cdot U_H}{U_H - I_H \cdot R_H} = \frac{\omega_H \cdot U_H}{E_H} \quad (3.9)$$

Полные потери мощности ΔP_H , Вт, в двигателе при $P = P_H$:

$$\Delta P_H = \Delta P_H - \Delta P_H = \Delta P_H \left(\frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \right) \quad (3.10)$$

Задача 3.1. Для ДПТ независимого возбуждения, используя следующие его паспортные (номинальные) данные: $P_H = 2,5$ кВт; $U_H = 110$ В; $\eta_H = 72\%$; $n_H = 1000$ об/мин, определить величины, характеризующие его работу в номинальном режиме, и построить

естественную механическую характеристику.

Решение:

1. Определяем номинальный ток I_H , А, электродвигателя:

$$I_H = 1000 \frac{P_H}{U_H \eta_H} \quad (3.11)$$
$$I_H = 1000 \frac{2,5}{110 \cdot 0,72} = 31,6 \text{ А}$$

2. Определяем номинальное сопротивление R_H , Ом, электродвигателя:

$$R_H = \frac{U_H}{I_H} \quad (3.12)$$
$$R_H = \frac{110}{31,6} = 3,48 \text{ Ом}$$

3. Определяем внутреннее сопротивление цепи якоря $R_{я}$, Ом по формуле:

$$R_{я} = 0,5(1 - \eta_H)R_H \quad (3.13)$$
$$R_{я} = 0,5 \cdot (1 - 0,72) \cdot 3,48 = 0,487 \text{ Ом}$$

4. Определяем потерю напряжения $\Delta U_{я}$, В, в цепи якоря:

$$\Delta U_{я} = I_H \cdot R_{я} \quad (3.14)$$
$$\Delta U_{я} = 31,6 \cdot 0,487 = 15,4 \text{ В}$$

5. Определяем номинальную ЭДС E_H , В, якоря

$$E_H = U_H - \Delta U_{я} \quad (3.15)$$
$$E_H = 110 - 15,4 = 94,6 \text{ В}$$

6. Определяем номинальную скорость вращения ω_H , рад/с, якоря:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} \quad (3.16)$$
$$\omega_H = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ рад/с}$$

7. Определяем номинальный вращающий момент M_H , Н · м, на валу электродвигателя:

$$M_H = 1000 \frac{P_H}{\omega_H} \quad (3.17)$$
$$M_H = 1000 \frac{2,8}{105} = 23,8 \text{ Н · м}$$

8. Определяем номинальную мощность $P_{эH}$, кВт, потребляемую электродвигателем из электрической сети:

$$P_{эH} = \frac{P_H}{\eta_H} \quad (3.18)$$
$$P_{эH} = \frac{2,5}{0,72} = 3,47 \text{ кВт}$$

9. Определяем полные номинальные потери мощности ΔP_H , кВт, в электродвигателе:

$$\Delta P_H = P_H \left(\frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \right) \quad (3.19)$$

$$\Delta P_H = 2,5 \left(\frac{1 - 0,72}{0,72} \right) = 0,97 \text{ кВт}$$

10. Определяем скорость идеального холостого хода ω_0 , рад/с, при номинальном напряжении

$$\omega_0 = \frac{U_H \cdot \omega_H}{E_H} \quad (3.20)$$

$$\omega_0 = \frac{110 \cdot 105}{94,6} = 122 \text{ рад/с}$$

11. Определяем коэффициент пропорциональности C_H Вб

$$C_H = \frac{E_H}{\omega_H} \quad (3.21)$$

$$C_H = \frac{94,6}{105} = 0,9 \text{ Вб}$$

12. Определяем номинальный электромагнитный момент $M_{эH}$, Н · м, по формуле

$$M_{эH} = C_H \cdot I_H \quad (3.22)$$

$$M_{эH} = 0,9 \cdot 31,6 = 28,4 \text{ Н · м}$$

13. Определяем перепад скорости вращения:

$$\delta_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} \quad (3.23)$$

$$\delta_H = \frac{122 - 105}{122} = 0,14$$

14. Определяем момент холостого хода M_{xx} , Н · м. (момент потерь):

$$M_{xx} = M_{эH} - M_H \quad (3.24)$$

$$M_{xx} = 28,4 - 23,8 = 4,6 \text{ Н · м}$$

15. Определяем скорость вращения ω_{xx} , рад/с, реального холостого хода

$$\omega_{xx} = \frac{U_H}{C_H} - M_{xx} \frac{R_{я}}{C_H^2} \quad (3.25)$$

$$\omega_{xx} = \frac{110}{0,9} - 4,6 \cdot \frac{0,487}{0,81} = 119,2 \text{ рад/с}$$

Анализируя уравнение (3.6), можно сделать вывод о том, что механическая характеристика ДПТ параллельного или независимого возбуждения при $U = \text{const}$; $\Phi = \text{const}$; $R = \text{const}$ представляет собой прямую линию.

Для построения естественной механической характеристики ДПТ независимого возбуждения в двигательном режиме достаточно знать две точки с координатами: А ($M = 0$; $\omega = \omega_0$); В ($M = M_H$; $\omega = \omega_H$). (рисунок 3.1)

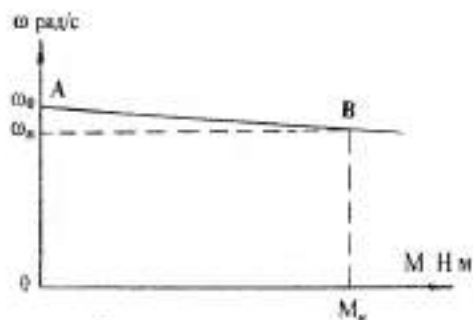


Рисунок 3.1- Построение естественной механической характеристики ДПТ независимого возбуждения

3.3 Определение количества и величины секций пускового резистора ДПТ с независимым возбуждением

Двигатель постоянного тока (ДПТ) запускается при полностью введённом пусковом резисторе (реостате), который служит для ограничения пускового тока при подаче номинального напряжения в якорную цепь. Пусковой ток ($I_{\text{пуск}}$) превышает номинальный ток ($I_{\text{н}}$) в 30-40 раз, поэтому без пускового реостата обмотки ДПТ сгорят. Пусковой реостат состоит из секций.

Определить количество и величины сопротивлений секций пускового реостата можно графическим и аналитическим способами.

Графический метод:

Для определения количества и величины секций пускового реостата графическим способом необходимо построить пусковую диаграмму ДПТ с независимым возбуждением (рисунок 3.2).

- 1) Строим естественную механическую характеристику ДПТ НВ по двум точкам: А и В;
- 2) Определяем искусственный пусковой момент M_1 , Н·м, согласно законов коммутации:

$$M_1 = (2 - 2,5)M_{\text{н}} \quad (3.26)$$

- 3) Определяем момент переключения M_2 , Н·м, секций пускового реостата:

$$M_2 = (1,1 - 1,5)M_{\text{н}} \quad (3.27)$$

- 4) Строим прямые $M = M_1$ и $M = M_2$
- 5) Соединяем точку 1 и точку А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 2, из точки 2 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 3; соединяем точку 3 с точкой А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 4, из точки 4 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 5; соединяем точку 5 с точкой А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 6, из точки 6 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 7.

(Цифра 7 обязательно должна находиться на пересечении естественной механической характеристики ДПТ и прямой $M = M_1$ -это может быть достигнуто путём подбора коэффициентов от 1 до 1,5 у момента переключения M_2 и коэффициентов от 2,0 до 2,5 у пускового момента M_1 . По пусковой диаграмме определяем количество ступеней пускового реостата (m).

- 6) Проводим прямую $\omega = \omega_0$ параллельную оси моментов и обозначаем точку

пересечения с прямой $M = M_2$ цифрой 9, точку пересечения механической характеристики с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 8, а точку пересечения прямых $M = M_1$ и $\omega = \omega_0$ цифрой 10.

7) Определяем масштаб m_R , Ом/мм, сопротивлений: замеряем расстояние отрезка (7-10) в мм.

$$m_R = \frac{R_{\Sigma}}{7-10} \quad (3.28)$$

8) Определяем величину сопротивления первой секции R_1 Ом, пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (1 - 3) в мм.

$$R_1 = m_R \cdot (1 - 3) \quad (3.29)$$

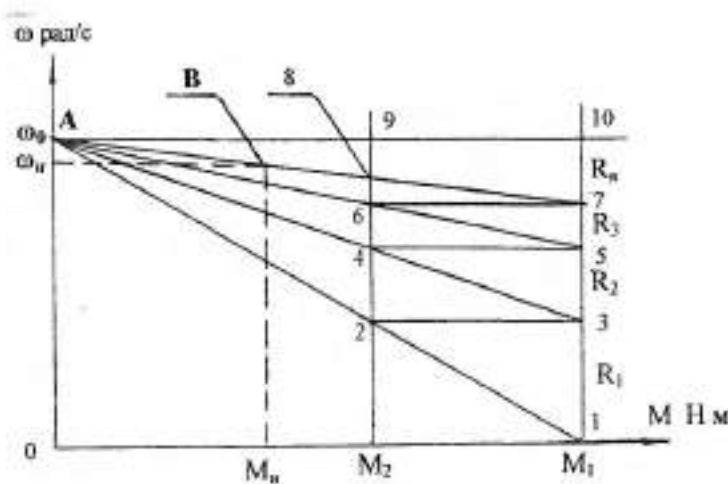


Рисунок 3.2-Пусковая диаграмма ДПТ независимого возбуждения

9) Определяем величину сопротивления второй секции R_2 , Ом, пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (3 - 5) в мм.

$$R_2 = m_R \cdot (3 - 5) \quad (3.30)$$

10) Определяем величину сопротивления второй секции R_3 , Ом, пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (5 - 7) в мм.

$$R_3 = m_R \cdot (5 - 7) \quad (3.31)$$

11) Определяем суммарное сопротивление ΣR , Ом, якорной цепи при полностью введённом пусковом реостате

$$\Sigma R = R_{\Sigma} + R_1 + R_2 + R_3 \quad (3.32)$$

Аналитический метод:

При аналитическом методе расчёта сначала определяется колебание момента при пуске λ .

а) Если заданы число ступеней m и момент переключения при пуске M_2

$$\lambda = \frac{m+1}{\sqrt{R_{\Sigma} M_2}} \quad (3.33)$$

б) Если заданы число ступеней m и максимальный момент при пуске M_1

$$Л = \sqrt[m]{\frac{R_H M_H}{R_{я} M_1}} \quad (3.34)$$

с) Если заданы M_1 и M_2 , сначала определяется $л = \frac{M_1}{M_2}$ а затем определяется число пусковых ступеней:

$$m = \frac{\lg \frac{M_H R_H}{R_{я} M_1}}{\lg л} \quad (3.35)$$

Так как стоит задача определить число и величину сопротивлений ступеней пускового реостата, следовательно, задаются M_1 и M_2 .

1) Задаёмся $M_1 = (2 - 2,5)M_H$, соответственно $I_1 = (2 - 2,5)I_H$, А; $M_2 = (1,1 - 1,5)M_H$

где I_1 - пусковой ток ДПТ НВ соответствующий M_1 .

2) Определяем сопротивление цепи якоря R_N , Ом, при полностью включённом пусковом резисторе

$$R_N = \Sigma R = \frac{U_H}{I_1} \quad (3.36)$$

$$R_N = \frac{M_H \cdot R_H}{M_1} \quad (3.37)$$

3) Определяем колебания момента (тока) при пуске:

$$л = \frac{M_1}{M_2} \quad (3.38)$$

4) Определяем количество ступеней пускового реостата:

$$m = \frac{\lg \frac{R_H}{R_{я}}}{\lg л} \quad (3.39)$$

5) Принимаем m целым числом

6) Рассчитываем уточнённое значение $л$

$$л = \sqrt[m]{\frac{R_N}{R_{я}}} \quad (3.40)$$

7) Определяем величины сопротивлений секций пускового реостата

$$R_m = R_{я}(л - 1) \quad (3.41)$$

$$R_{m-1} = R_{я} \cdot л \cdot (л - 1) = R_m \cdot л \quad (3.42)$$

$$R_1 = R_{я} \cdot л^{m-1} \cdot (л - 1) = R_2 \cdot л \quad (3.43)$$

Задача 3.2 Определить графически и аналитически величины и число ступеней пускового реостата для ДПТ НВ типа 4ПНМ180Б, имеющего следующие паспортные данные:

$P_H = 10$ кВт; $U_H = 220$ В; $I_H = 53$ А; $n_H = 1100$ об/мин; $\eta_H = 83,6\%$.

Решение:

1. Определяем внутреннее сопротивление $R_{я}$, Ом, цепи якоря: (3-44)

$$R_{я} \approx 0,5(1 - \eta_H) \frac{U_H}{I_H} \quad (3.44)$$

$$R_{я} = 0,5(1 - 0,836) \frac{220}{53} = 0,34 \text{ Ом}$$

$$R_H = \frac{U_H}{I_H} \quad (3.45)$$

$$R_H = \frac{220}{53} = 4,15 \text{ Ом}$$

2. Определяем номинальную скорость вращения ω_H , рад/с, электродвигателя:

$$\omega_H = \frac{p \cdot n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 1100}{30} = 115,1 \text{ рад/с} \quad (3.46)$$

3. Определяем скорость вращения идеального холостого хода ω_0 , рад/с, ДПТ
4.

$$\omega_0 = \frac{U_H \cdot \omega_H}{U_H - I_H \cdot R_{\Sigma}} = \frac{220 \cdot 115,1}{220 - 53 \cdot 0,34} = 124,3 \text{ рад/с} \quad (3.47)$$

5. Определяем коэффициент пропорциональности

$$C_H = \frac{U_H - I_H \cdot R_{\Sigma}}{\omega_H} \quad (3.48)$$

$$C_H = \frac{220 - 53 \cdot 0,34}{115,1} = 1,7$$

6. Определяем номинальный электромагнитный момент M_H Н · м,

$$M_H = C_H \cdot I_H \quad (3.49)$$

$$M_H = 1,7 \cdot 53 = 90 \text{ Н · м}$$

7. Определяем пусковой момент M_1 Н · м, (задаёмся крайним правым пределом - 2,5)

$$M_1 = 2,5 \cdot M_H \quad (3.50)$$

$$M_1 = 2,5 \cdot 90 = 225 \text{ Н · м}$$

8. Строим пусковую диаграмму ДПТ, варьируя пределами M_2 от 1,1 до 1,5, устанавливаем истинное значение коэффициента- 1,5 и количество ступеней пускового реостата:

Согласно рисунка 3.3: $m_r = 3$;

9. Определяем момент M_2 Н · м, переключения

$$M_2 = 1,5 \cdot M_H \quad (3.51)$$

$$M_2 = 1,5 \cdot 90 = 135 \text{ Н · м}$$

10. Определяем момент M_2 , Н-м, переключения

$$m_R = \frac{R_{\Sigma}}{7-10} \quad (3.52)$$

$$m_R = \frac{0,34}{13} = 0,027 \text{ Ом/мм}$$

11. Определяем величину сопротивления первой секции R_1 , Ом, пускового реостата:

$$R_1 = m_R \cdot (1 - 3); \quad (3.53)$$

$$R_1 = 0,027 \cdot 25 = 0,67 \text{ Ом};$$

12. Определяем величину сопротивления второй секции R_2 , Ом, пускового реостата:

$$R_2 = m_R \cdot (3 - 5); \quad (3.54)$$

$$R_2 = 0,027 \cdot 15 = 0,4 \text{ Ом};$$

13. Определяем величину сопротивления третьей секции R_3 , Ом, пускового реостата:

$$R_3 = m_R \cdot (5 - 7); \quad (3.55)$$

$$R_3 = 0,027 \cdot 9 = 0,24 \text{ Ом};$$

14. Определяем суммарное сопротивление R_n , Ом, роторной цепи при полностью введённом пусковом реостате:

15.

$$\Sigma R = R_{я} + R_1 + R_2 + R_3; \quad (3.56)$$

$$\Sigma R = 0,34 + 0,67 + 0,4 + 0,24 = 1,65 \text{ Ом};$$

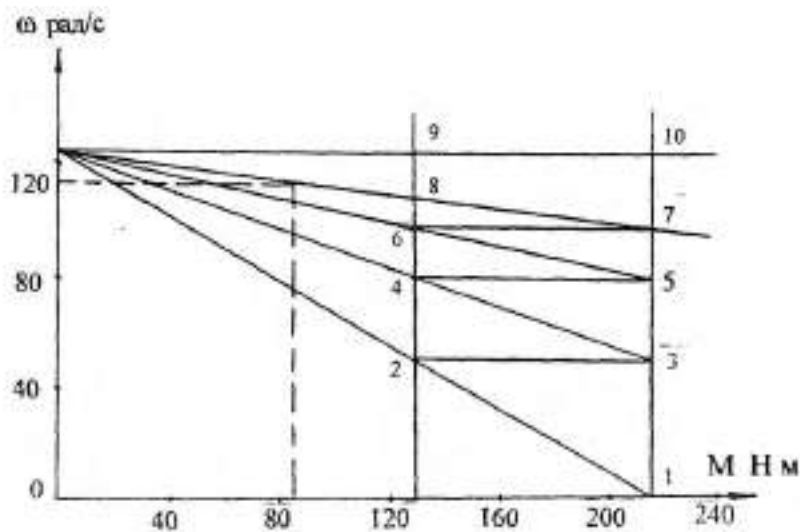


Рисунок 3.3 - Пусковая диаграмма ДПТ типа 4ПНМ180Л

Аналитический метод.

1) Дано: $M_1 = 2,5 \cdot M_n = 225 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_2 = 1,5 \cdot M_n = 135 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $I_1 = 2,5 \cdot I_n = 132,5 \text{ А}$;

2) Определяем величину сопротивления второй ступени R_2 , Ом, пускового реостата

$$R_N = \frac{U_n}{I_1} \quad (3.57)$$

$$R_N = \frac{220}{132,5} = 1,66 \text{ Ом}$$

$$R_N = \frac{M_n \cdot R_n}{M_1} \quad (3.58)$$

$$R_N = \frac{90 \cdot 4,15}{225} = 1,66 \text{ Ом}$$

3) Определяем колебания момента (тока) при пуске:

$$л = \frac{M_1}{M_2} \quad (3.59)$$

$$л = \frac{225}{135} = 1,66$$

4) Определяем количество ступеней пускового реостата:

$$m = \frac{\lg \frac{R_H}{R_A}}{\lg l} \quad (3.60)$$

$$m = \frac{\lg \frac{1,66}{0,34}}{\lg 1,66} = 3,09$$

5) Принимаем $m=3$. Рассчитываем уточнённое значение l

$$l = \sqrt[m]{\frac{R_H}{R_A}} \quad (3.61)$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{1,66}{0,34}} = 1,69$$

6) Определяем величины сопротивлений ступеней пускового реостата

$$R_3 = R_A \cdot (l - 1) \quad (3.62)$$

$$R_3 = 0,34 \cdot (1,69 - 1) = 0,24 \text{ Ом}$$

$$R_2 = R_3 \cdot l \quad (3.63)$$

$$R_2 = 0,24 \cdot 1,69 = 0,4 \text{ Ом}$$

$$R_1 = R_2 \cdot l \quad (3.64)$$

$$R_1 = 0,4 \cdot 1,69 = 0,67 \text{ Ом}$$

Анализ результатов расчёта показывает, что графический метод расчёта пусковых резисторов ДПТ независимого возбуждения более прост и нагляден, но менее точен, чем аналитический.

4. Механика электропривода

При выборе параметров электродвигателя, приводящего в движение рабочую машину, очень важно разрешение вопроса о совместном действии вращающего момента, развиваемого электродвигателем, и момента сопротивления рабочей машины.

4.1 Статические и динамические нагрузки

Вращающий момент. Соотношение между полезной мощностью электродвигателя $P_{дв}$, Вт, его вращающим моментом $M_{дв}$ Н · м, и скоростью вращения $\omega_{дв}$, рад/с, определяется следующей зависимостью:

$$P_{дв} = M_{дв} \cdot \omega_{дв} \quad (4.1)$$

Если вал электродвигателя соединён непосредственно с валом рабочей машины, то частота вращения вала электродвигателя равна частоте вращения вала рабочей машины, и мощность, развиваемая электродвигателем в установившемся режиме, равна мощности, потребляемой рабочей машиной P_m , Вт, то есть

$$P_{дв} = P_m \quad (4.2)$$

Эту мощность на валу, на основании формулы (4.1), можно выразить произведением момента на скорость вращения

$$M_{дв} \cdot \omega_{дв} = M_c \cdot \omega_m \quad (4.3)$$

где M_c - момент сопротивления рабочей машины, Н · м; ω_m - скорость вращения рабочей машины, рад/с
следовательно

$$M_{дв} = M_c \quad (4.4)$$

Момент сопротивления, приложенный к валу электродвигателя со стороны рабочей машины M_c , в установившемся режиме работы называется **статическим моментом сопротивления**. При неизменной скорости вращения и неизменной нагрузки момент статического сопротивления является величиной постоянной.

Если же скорость вращения системы, состоящей из электродвигателя и рабочей машины, изменяется, то в этом случае появляется динамическая нагрузка $P_{дин}$, Вт. которая определяется по формуле

$$P_{дв} - P_m = P_{дин} \quad (4.5)$$

Это уравнение мощностей справедливо при вращении системы с любой скоростью вращения.

Динамическую нагрузку $P_{дин}$, Вт можно выразить через динамический момент $M_{дин}$. Н м и скорость вращения вала электродвигателя

$$P_{дин} = M_{дин} \cdot \omega \quad (4.6)$$

В свою очередь динамический момент можно определить по формуле

$$M_{дин} = J_{сис} \frac{d\omega}{dt} \quad (4.7)$$

где $J_{сис}$ - момент инерции системы, приведённый к валу электродвигателя кг · м²;
 $\frac{d\omega}{dt}$ -угловое ускорение системы, рад/с².

4.2 Основное уравнение движения электропривода

Механическая энергия, развиваемая электродвигателем при работе электропривода, расходуется на преодоление сопротивления рабочей машины.

При вращательном движении уравнение движения можно записать следующим образом:

$$M_{дв} - M_c = M_{дин} = J_{сис} \frac{d\omega}{dt} \quad (4.8)$$

где $M_{дв}$ — вращающий момент, развиваемый электродвигателем, Н-м; M_c -момент сопротивления рабочей машины, Н · м;

$M_{дин}$ - динамический момент, Н · м;

$J_{сис}$ - момент инерции системы, приведённый к валу электродвигателя, кг · м²;

$\frac{d\omega}{dt}$ -угловое ускорение системы, рад/с².

Динамический момент $M_{дин}$ появляется только во время переходных режимов, когда изменяется угловая скорость.

При поступательном движении уравнение движения системы по аналогии с вращательным движением можно записать следующим образом

$$F - F_c = m \frac{dv}{dt} \quad (4.9)$$

где F - движущая сила, Н;

F_c - сила статического сопротивления, Н;

v - скорость поступательного движения, м/с;

m - масса движущего груза, кг;

$m \frac{dv}{dt}$ --динамическая сила, Н.

4.3 Приведение моментов сопротивления рабочей машины к валу электродвигателя

Когда вал рабочей машины соединён непосредственно с валом электродвигателя, рабочая машина и вал электродвигателя вращаются с одинаковой угловой скоростью, в этом случае никакого приведения моментов не требуется.

Если рабочая машина соединена с электродвигателем при помощи передачи, то скорость вращения вала машины ω_m , рад/с, отличается от скорости вращения вала электродвигателя ω_{dv} , рад/с, поэтому момент сопротивления рабочей машины M_m необходимо привести к скорости вращения вала электродвигателя.

Если рабочая машина совершает вращательное движение, то момент сопротивления рабочей машины $M_{сн}$ Н·м, приведённый к валу электродвигателя, определяется по формуле:

$$M_{сн} = \frac{M_m}{i \cdot \eta_n} \quad (4.10)$$

где M_m - момент сопротивления рабочей машины относительно своего вала, Н·м; i - передаточное отношение редуктора (передачи); η_n - коэффициент полезного действия редуктора (передачи);

Передаточное отношение редуктора определяется по формуле:

$$i = \frac{\omega_{dv}}{\omega_v} \quad (4.11)$$

где ω_{dv} - угловая скорость вращения вала электродвигателя, рад/с; ω_v - угловая скорость вращения вала рабочей машины, рад/с;

Если передача от электродвигателя к рабочей машине состоит из нескольких звеньев, то общее передаточное отношение передачи от электродвигателя к рабочей машине равняется произведению передаточных отношений отдельных звеньев

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \quad (4.12)$$

аналогично, общий коэффициент полезного действия передачи, состоящей из нескольких звеньев, определяется

$$\eta_n = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \quad (4.13)$$

Если рабочая машина совершает поступательное движение, то момент сопротивления рабочей машины $M_{сн}$ Н·м, приведённый к валу электродвигателя, определяется по формуле:

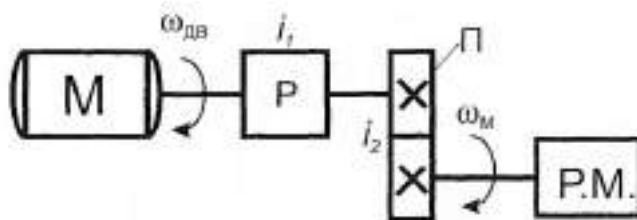
$$M_{сн} = \frac{F \cdot v}{\omega_{dv} \cdot \eta_n} \quad (4.14)$$

где F -сила сопротивления рабочей машины, обусловленная массой груза m , кг; v - скорость поступательного движения груза, м/с;

$$F = 9.81 \cdot m \cdot f_{тр} \quad (4.15)$$

Где $f_{тр}$ – коэффициент трения;

Задача 4.1 Определить потребную (расчётную) мощность асинхронного электродвигателя с к.з. ротором с синхронной частотой вращения $n_c = 1500$ об/мин, приводящего в движение рабочую машину. Кинематическая схема привода рабочей машины представлена на рисунке 4.1.



М – электродвигатель; Р – редуктор; П- клиноремённая передача; Р.М, - рабочая машины; i_1 - передаточное отношение редуктора; i_2 - передаточное отношение клиноремённой передачи; $\omega_{ДВ}$ - угловая скорость вращения вала электродвигателя; $\omega_{М}$ -угловая скорость вращения вала рабочей машины.

Рисунок 4.1 Кинематическая схема системы «электродвигатель – рабочая машина»

Момент сопротивления на валу рабочей машины: $M_{М} = 1200 \text{ Н}\cdot\text{м}$; Передаточное отношение редуктора $i_1 = 28$; передаточное отношение клиноремённой передачи, $i_2 = 2$; к.п.д. редуктора $\eta_p = 0,86$; к.п.д. клиноремённой передачи $\eta_{пер} = 0,8$.

Решение:

1. Определяем скорость вращения $\omega_{ДВ}$, рад/с, электродвигателя

$$\omega_{ДВ} = \frac{\omega_{М} \cdot i_2 \cdot i_1}{1} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с.} \quad (4.16)$$

2. Определяем общее передаточное отношение

$$i = i_1 \cdot i_2 = 28 \cdot 2 = 56 \quad (4.17)$$

3. Определяем общий к.п.д. системы

$$\eta = \eta_p \cdot \eta_{пер} = 0,86 \cdot 0,8 = 0,69 \quad (4.18)$$

4. Определяем момент сопротивления рабочей машины $M_{сн} \text{ Н}\cdot\text{м}$, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{сн} = \frac{M_{М}}{i \cdot \eta} = \frac{1200}{56 \cdot 0,69} = 31 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (4.19)$$

5. Определяем расчётную мощность $P_{рас} \text{ -Вт}$, электродвигателя

$$P_{рас} = M_{сн} \cdot \omega_{ДВ} = 31 \cdot 157 = 4867 \text{ Вт} \quad (4.20)$$

Задача 4.2. Определить потребную (расчётную) мощность асинхронного электродвигателя с к.з. ротором с синхронной частотой вращения $n_c = 1000 \text{ об/мин}$, приводящего в движение рабочую машину. Кинематическая схема привода рабочей машины представлена на рисунке 4.2.

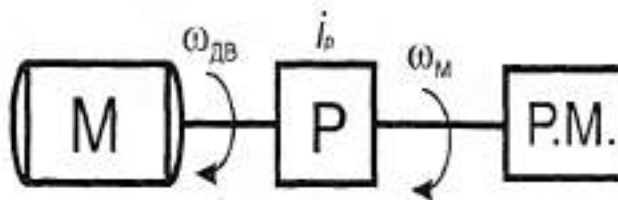


Рисунок 4.2 – Кинематическая схема системы «электродвигатель-рабочая машина»

Рабочая машина совершает поступательное движение и проходит расстояние $S = 6$ метров за 40 секунд; к.п.д. редуктора $\eta_p = 0,66$; Усилие необходимое для передвижения механизма $F = 36000$ Н.

Решение:

1. Определяем скорость вращения $\omega_{дв}$, рад/с, электродвигателя

$$\omega_{дв} = \frac{p \cdot n_c}{30} \quad (4.21)$$

$$\omega_{дв} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ рад/с.}$$

2. Определяем скорость поступательного движения v , м/с, рабочей машины

$$v = \frac{S}{t} \quad (4.22)$$

$$v = \frac{6}{40} = 0,15 \text{ м/с}$$

3. Определяем момент сопротивления рабочей машины $M_{сн}$ Н · м, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{сн} = \frac{F \cdot v}{\omega_{дв} \cdot \eta_p} = \frac{36000 \cdot 0,15}{105 \cdot 0,66} = 78 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.23)$$

4. Определяем расчётную мощность $P_{рас}$ -Вт, электродвигателя

$$P_{рас} = M_{сн} \cdot \omega_{дв} = 78 \cdot 105 = 8190 \text{ Вт} \quad (4.24)$$

4.4 Приведение моментов инерции рабочей машины к валу электродвигателя

Момент инерции системы $J_{сис}$ кг · м², «электродвигатель-рабочая машина», включающего в себя редуктор определяется по формуле:

$$J_{сис} = J_{дв} + J_p + J_m \quad (4.25)$$

где $J_{дв}$ - момент инерции электродвигателя, кг·м²; (даётся в паспорте электродвигателя);

J_p - момент инерции редуктора, кг·м²;

J_m - момент инерции рабочей машины, приведённый к валу электродвигателя, кг·м²;

$$J_p = 1,1 \cdot J_{дв} \quad (4.26)$$

Для вращательного движения рабочей машины её момент инерции, приведённый к валу электродвигателя J_M , кг·м², определяется по формуле:

$$J_M = \frac{J_c}{i^2} \text{ или } J_M = J_c \frac{\omega_M^2}{\omega_{дв}^2} \quad (4.27)$$

где J_c - момент инерции рабочей машины на своём валу, кг·м²; ω_M - скорость вращения вала рабочей машины, рад/с; $\omega_{дв}$ - скорость вращения вала электродвигателя, рад/с;

Для поступательного движения рабочей машины её момент инерции, приведённый к валу электродвигателя J_M , кг·м², определяется по формуле

$$J_M = m \frac{v^2}{\omega_{дв}^2} \quad (4.28)$$

где m - масса поступательно движущихся частей рабочей машины, кг; v - скорость поступательного движения рабочей машины, м/с; $\omega_{дв}$ - скорость вращения вала электродвигателя, рад/с;

Если рабочая машина включает поступательно и вращательно движущиеся части, то приведённый к валу электродвигателя момент инерции J_M , кг·м², определяется по формуле:

$$J_M = J_c \frac{\omega_M^2}{\omega_{дв}^2} + m \frac{v^2}{\omega_{дв}^2} \quad (4.29)$$

Задача 4.3. Определить расчётную мощность асинхронного электродвигателя с к.з. ротором и момент инерции системы «электродвигатель- механизм подъёмной лебёдки», кинематическая схема которой представлена на рисунке 4.3.

Дано:

Скорость вращения приводного электродвигателя $n_{дв} = 157$ рад/с; момент инерции электродвигателя $J_{дв} = 0,08$ кг·м²; к.п.д. передачи $\eta_n = 0,92$; масса барабана $m_б = 1400$ кг; радиус барабана $R = 1,25$ м; масса груза $m_{гр} = 200$ кг; скорость поступательного движения груза $v = 0,22$ м/с; коэффициент трения $f_{тр} = 0,66$.

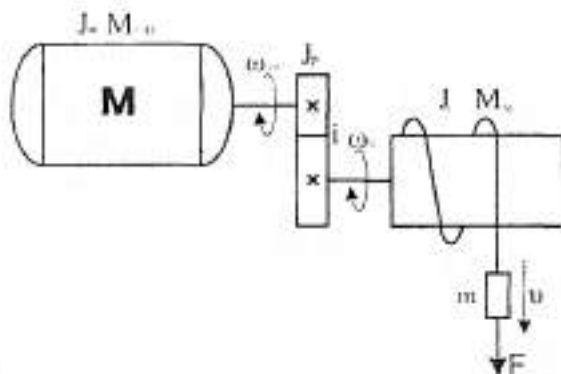


Рисунок 4.3- Кинематическая схема системы «электродвигатель- - подъёмная лебёдка»

Решение:

1. Определяем момент инерции барабана относительно своей оси $J_{бар}$, кг·м², как для сплошного цилиндра:

$$J_{бар} = m_б \cdot r^2 = m_б \cdot \frac{R^2}{2} \quad (4.30)$$

где $m_б$ - масса барабана, кг;

p - радиус инерции сплошного цилиндра, м;
 R - радиус барабана, м;

$$J_{\text{бар}} = 1400 \cdot \frac{1.25^2}{2} = 1093 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

2. Определяем скорость вращения $\omega_{\text{дв}}$, рад/с, вала машины

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot p \cdot v}{R} \quad (4.31)$$

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.22}{1.25} = 1.1 \text{ рад/с}$$

3. Определяем момент инерции машины, приведённый к валу электродвигателя

$$J_{\text{м}} = J_{\text{с}} \frac{n_{\text{м}}^2}{\omega_{\text{дв}}^2} + m \frac{v^2}{\omega_{\text{дв}}^2} \quad (4.32)$$

$$J_{\text{м}} = 1093 \frac{1.1^2}{157^2} + 200 \frac{0.22^2}{157^2} = 0.0544 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

4. Определяем момент инерции $J_{\text{р}}$, кг · м². Редуктора

$$J_{\text{р}} = 1.1 \cdot J_{\text{дв}} \quad (4.33)$$

$$J_{\text{р}} = 1.1 \cdot 0.08 = 0.088 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

5. Определяем момент инерции $J_{\text{сис}}$ кг · м² системы

$$J_{\text{сис}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}} + J_{\text{м}} \quad (4.34)$$

$$J_{\text{сис}} = 0.08 + 0.088 + 0.0544 = 0.222 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

6. Определяем передаточное отношение редуктора

$$i = \frac{\omega_{\text{дв}}}{\omega_{\text{м}}} = \frac{157}{1.1} = 142 \quad (4.35)$$

7. Определяем усилие F , Н, необходимое для поднятия груза

$$F = 9.81 \cdot m_{\text{гр}} \cdot f_{\text{тр}} \quad (4.36)$$

$$F = 9.81 \cdot 200 \cdot 0.66 = 1295 \text{ Н}$$

где $m_{\text{гр}}$ - масса груза, кг;

$f_{\text{тр}}$ - коэффициент трения ($f_{\text{тр}} = 0.66$);

8. Определяем вращающий момент механизма $M_{\text{м}}$ Н · м, подъёма груза на своём валу

$$M_{\text{м}} = F \cdot R \quad (4.37)$$

$$M_{\text{м}} = 1295 \cdot 1.25 = 1619 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

9. Определяем вращающий момент $M_{\text{сн}}$ Н · м, механизма подъёма груза, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{\text{сн}} = \frac{M_{\text{м}}}{i \cdot \eta_{\text{п}}} \quad (4.38)$$

$$M_{\text{сн}} = \frac{1619}{142 \cdot 0.92} = 12.4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

где $M_{\text{м}}$ - вращающий момент барабана относительно оси, проходящей через центр тяжести и проходящей параллельно длине барабана, Н · м;

i - передаточное отношение редуктора;

$\eta_{\text{п}}$ - к.п.д. редуктора/

10. Определяем расчётную мощность $P_{\text{рас}}$ Вт, приводного электродвигателя ме-

ханизма подъёма груза

$$P_{\text{рас}} = M_{\text{сн}} \cdot \omega_{\text{дв}} \text{ Вт} \quad (4.39)$$

$$P_{\text{рас}} = 12.4 \cdot 157 = 1947 \text{ Вт}$$

Задача 4.4 Грузоподъёмная лебёдка, кинематическая схема которой представлена на рисунке 4.4 имеет грузоподъёмность: вес поднимаемого груза и крюка $G = 22600 \text{ Н}$.

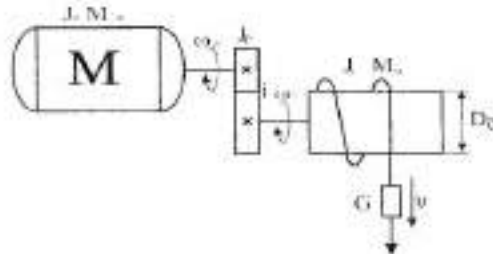


Рисунок 4.4 – Кинематическая схема грузоподъёмной лебёдки

Диаметр барабана $D_b = 0,4 \text{ м}$; к.п.д. барабана $\eta_b = 0,97$; к.п.д. редуктора $\eta_p = 0,96$; скорость вращения электродвигателя $\omega_{\text{дв}} = 104,5 \text{ рад/с}$; передаточное отношение редуктора $i = 25$; момент инерции электродвигателя $J_{\text{дв}} = 0,84 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент инерции барабана на своём валу $J_b = 77,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;

Определить:

- а) скорость подъёма груза;
- б) моменты на валах барабана и электродвигателя при подъёме и опускании груза;
- в) мощность на валу электродвигателя при подъёме груза;
- г) момент инерции системы «электродвигатель- механизм подъёма груза».

Решение:

1. Определяем скорость вращения ω_m , рад/с, барабана

$$\omega_m = \frac{\omega_{\text{дв}}}{i} \quad (4.40)$$

$$\omega_m = \frac{104.5}{25} = 4.18 \text{ рад/с}$$

2. Определяем скорость поступательного движения v , м/с, перемещения груза

$$v = \frac{\omega_m \cdot R}{2 \cdot \pi} \quad (4.41)$$

$$v = \frac{4.18 \cdot 0.4/2}{2 \cdot 3.14} = 0.133 \text{ м/с}$$

3. Определяем вращающий момент на валу барабана $M_m \text{ Н} \cdot \text{м}$, при подъёме груза

$$M_m = \frac{G \cdot v}{\omega_m \cdot \eta_b} \quad (4.42)$$

$$M_m = \frac{22600 \cdot 0.133}{4.18 \cdot 0.97} = 741.33 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

4. Определяем вращающий момент механизма подъёма груза $M_{\text{сн}} \text{ Н} \cdot \text{м}$, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{\text{сн}} = \frac{M_{\text{м}}}{i \cdot z_{\text{п}}} \quad (4.43)$$

$$M_{\text{сн}} = \frac{741.33}{25 \cdot 0.96} = 19.94 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

5. Определяем вращающий тормозной момент на валу барабана $M_{\text{тм}}$ Н · м, при спуске груза

$$M_{\text{тм}} = M_{\text{м}} \cdot z_{\text{п}}^2 \quad (4.44)$$

$$M_{\text{тм}} = 741.33 \cdot 0.96^2 = 711.7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

6. Определяем вращающий тормозной момент механизма опускания груза $M_{\text{т}}$ Н · м, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{\text{т}} = \frac{M_{\text{тм}}}{i} z_{\text{п}}^2 \quad (4.45)$$

$$M_{\text{т}} = \frac{711.7}{25} 0.96^2 = 26.23 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

7. Определяем мощность на валу электродвигателя $P_{\text{рас}}$ Вт, при подъёме груза

$$P_{\text{рас}} = M_{\text{сн}} \cdot \omega_{\text{дв}} \quad (4.46)$$

$$P_{\text{рас}} = 19.94 \cdot 104.5 = 2083.7 \text{ Вт}$$

8. Определяем момент инерции системы $J_{\text{сис}}$ кг · м², «электродвигатель- механизм подъёма груза

$$J_{\text{сис}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}} + \frac{J_{\text{б}}}{i^2} \quad (4.47)$$

$$J_{\text{сис}} = 0.84 + 1.1 + \frac{77.5}{25^2} = 1.888 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

4.5 Расчёт времени пуска и торможения системы «электродвигатель-рабочая машина»

Основное уравнение движения электропривода (4.48) даёт возможность определить продолжительность переходного процесса при пуске, торможении, а также при переходе от одной угловой скорости к другой.

$$M_{\text{дв}} - M_{\text{с}} = M_{\text{дин}} = J_{\text{сис}} \frac{d\omega}{dt} \quad (4.48)$$

В простейшем случае, когда можно принять $M_{\text{дв}} = \text{const}$, $M_{\text{с}} = \text{const}$ и $J_{\text{сис}} = \text{const}$ (например, при пуске ДПТ посредством пускового реостата в цепи якоря или при пуске АД с фазным ротором при помощи пускового реостата в цепи ротора), уравнение движения (4.40) будет линейным и имеет решение:

$$t_{\text{пуск}} = J_{\text{сис}} \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{\text{дв}} - M_{\text{с}}} \quad (4.49)$$

где ω_1 - начальная угловая скорость вращения при пуске, рад/с; ($\omega_1 = 0$);
 ω_2 - конечная угловая скорость вращения при пуске, рад/с, т.е. скорость, при которой работает электродвигатель, ($\omega_2 = \omega_{\text{раб}}$);

$M_{\text{дв}}$ - за значение вращающего момента электродвигателя принимается его среднее значение: $M_{\text{ср}} = b \cdot M_{\text{н}}$; b - коэффициент пропорциональности, ($b = 1.2 \div 2$);

M_H - номинальный момент электродвигателя, Н · м;

Следовательно, время пуска $t_{\text{пуск}}$, с, рассчитывается по формуле

$$t_{\text{пуск}} = J_{\text{сис}} \frac{\omega_{\text{раб}}}{1,2 \cdot M_H - M_c} \quad (4.50)$$

При электрическом торможении (генераторном, противовключении, динамическом) время торможения $t_{\text{торм}}$, с, рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{торм}} = J_{\text{сис}} \frac{\omega_{\text{раб}}}{M_{\text{торм}} + M_c} \quad (4.51)$$

Если торможение осуществляется за счёт сил сопротивления, т.е. электродвигатель отключен от сети $M_{\text{дв}} = 0$, время торможения рассчитывается по формуле

$$t_{\text{торм}} = J_{\text{сис}} \frac{\omega_{\text{раб}}}{M_c} \quad (4.52)$$

Однако для многих электроприводов, когда моменты имеют определённую зависимость от угловой скорости (например, электропривод с АД с к.з. ротором) уравнение движения электропривода оказывается нелинейным и не поддаётся аналитическому решению. В таких случаях применяют для решения графоаналитические методы.

Задача 4.5. Определить время пуска системы «электродвигатель- рабочая машина», если рабочую машину, совершающую поступательное движение, приводит ДПТ с параллельным возбуждением типа: 4П42; $P_H = 2,2$ кВт; $U_H = 220$ В; $I_H = 13,3$ А; $n_H = 1000$ об/мин; $z_H = 0,75$; $J_{\text{дв}} = 0,015$ кг · м². Момент сопротивления и момент инерции рабочей машины на её валу составляют: $M_M = 101,5$ Н · м; $J_{\text{рм}} = 0,36$ кг · м². Передаточное отношение редуктора $i = 6$; к.п.д. редуктора $\eta_p = 0,94$.

Решение:

1. Определяем момент инерции редуктора J_p кг · м², по формуле

$$J_p = 1,1 \cdot J_{\text{дв}} \quad (4.53)$$
$$J_p = 1,1 \cdot 0,015 = 0,0165 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

2. Определяем момент инерции рабочей машины J_M кг · м², приведённый к валу электродвигателя

$$J_M = \frac{J_{\text{рм}}}{i^2} \quad (4.54)$$
$$J_M = \frac{0,36}{36} = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

3. Определяем момент инерции системы $J_{\text{сист}}$ кг · м² по формуле

$$J_{\text{сис}} = J_{\text{дв}} + J_p + J_M \quad (4.55)$$
$$J_{\text{сис}} = 0,015 + 0,0165 + 0,01 = 0,041 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

4. Определяем момент сопротивления рабочей машины $M_{\text{сн}}$ Н · м, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{\text{сн}} = \frac{M_M}{i \cdot \eta_p} \quad (4.56)$$
$$M_{\text{сн}} = \frac{101,5}{6 \cdot 0,94} = 18 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

5. Определяем скорость вращения электродвигателя

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{p \cdot n_n}{30} \quad (4.57)$$

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,6 \text{ рад/с.}$$

6. Определяем сопротивление якоря $R_{\text{я}}$ Ом, по формуле

$$R_{\text{я}} = 0,5(1 - z_n) \frac{U_n}{I_n} \quad (4.58)$$

$$R_{\text{я}} = 0,5(1 - 0,75) \frac{220}{13,3} = 2,06 \text{ Ом}$$

7. Определяем коэффициент пропорциональности

$$C = \frac{U_n - I_n \cdot R_{\text{я}}}{\omega_n} \quad (4.59)$$

$$C = \frac{220 - 13,3 \cdot 2,06}{104,6} = 1,83$$

8. Определяем скорость идеального холостого хода ω_0 , рад/с, электродвигателя по формуле

$$\omega_0 = \frac{U_n \cdot \omega_n}{U_n - I_n \cdot R_{\text{я}}} \quad (4.60)$$

$$\omega_0 = \frac{220 \cdot 104,6}{220 - 13,3 \cdot 2,06} = 119,9 \text{ рад/с}$$

9. Определяем рабочую скорость вращения $\omega_{\text{раб}}$, рад/с, решая совместно уравнение механической характеристики ДПТ и уравнение механической характеристики рабочей машины

$\omega = \omega_0 - \frac{R_{\text{я}}}{C^2} \cdot M$ - уравнение естественной механической характеристики ДПТ.

$M = M_{\text{сн}} = \text{const}$ - уравнение механической характеристики рабочей машины, движущийся поступательно

$$\omega_{\text{раб}} = \omega_0 - \frac{R_{\text{я}}}{C^2} \cdot M_{\text{сн}}$$

$$\omega_{\text{раб}} = 119,9 - \frac{2,06}{1,83^2} \cdot 18 = 108,9 \text{ рад/с}$$

10. Определяем номинальный момент M_n Н · м, электродвигателя

$$M_n = C \cdot I_n \quad (4.61)$$

$$M_n = 1,83 \cdot 13,3 = 24,34 \text{ Н · м}$$

11. Определяем время пуска $t_{\text{пуск}}$ с, системы

$$t_{\text{пуск}} = 0,041 \cdot \frac{\omega_{\text{раб}}}{a \cdot M_n - M_c} \quad (4.62)$$

$$t_{\text{пуск}} = J_{\text{сис}} \cdot \frac{\omega_{\text{раб}}}{1,2 \cdot 24,34 - 18} = 0,398 \text{ с}$$

Задача 4.6. Определить время торможения системы «электродвигатель- рабочая

машина», если электродвигатель останавливается за счёт сил сопротивления от $\omega_{\text{раб}} = 153$ рад/с. до нуля. Электродвигатель: АИРФ132М4; $J_{\text{дв}} = 0,027 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; рабочая машина - железный сплошной цилиндр, ось вращения которого проходит через центр тяжести. Радиус цилиндра $R = 0,4 \text{ м}$; длина цилиндра $l = 0,6 \text{ м}$; плотность железа $\gamma = 7,88 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент полезного действия и передаточное отношение редуктора $\eta_p = 0,9$; $i = 35$. Вращающий момент рабочей машины относительно своей оси $M_M = 1323 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Решение:

1. Определяем массу цилиндра $m_{\text{ц}}$, по формуле

$$m_{\text{ц}} = \rho \cdot R^2 \cdot l \cdot \gamma \quad (4.63)$$

$$m_{\text{ц}} = 3,14 \cdot 0,4^2 \cdot 0,6 \cdot 7,88 \cdot 10^3 = 2375 \text{ кг}$$

2. Определяем момент инерции цилиндра $J_{\text{с}}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, относительно своей оси

$$J_{\text{с}} = m_{\text{ц}} \cdot \rho^2 = m_{\text{ц}} \frac{R^2}{2} \quad (4.64)$$

$$J_{\text{с}} = 2375 \frac{0,4^2}{2} = 190 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

3. Определяем момент инерции рабочей машины, приведённый к валу электродвигателя

$$J_M = \frac{J_{\text{с}}}{i^2} \quad (4.65)$$

$$J_M = \frac{190}{35^2} = 0,155 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

4. Определяем момент инерции системы $J_{\text{сис}}$ $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, по формуле

$$J_{\text{сис}} = J_{\text{дв}} + J_p + J_M \quad (4.66)$$

$$J_{\text{сис}} = 0,027 + 1,1 \cdot 0,027 + 0,155 = 0,2117 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

5. Определяем момент сопротивления рабочей машины $M_{\text{сн}}$ $\text{Н} \cdot \text{м}$, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{\text{сн}} = \frac{M_M}{i \cdot \eta_p} \quad (4.67)$$

$$M_{\text{сн}} = \frac{1323}{35 \cdot 0,9} = 42 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

6. Определяем время торможения $t_{\text{торм}}$ с, системы «электродвигатель-рабочая машина»

$$t_{\text{торм}} = J_{\text{сис}} \frac{\omega_{\text{раб}}}{M_{\text{с}}} \quad (4.68)$$

$$t_{\text{торм}} = 0,2117 \frac{153}{42} = 0,771 \text{ с}$$

4.6 Графоаналитический метод определения времени пуска системы «АД с к.з. ротором - вентилятор»

Графоаналитический метод (или метод пропорций) анализа переходных процессов

электроприводов широко применяется во всех случаях, когда механические характеристики двигателя и рабочей машины нелинейные. Графоаналитический метод решения основного уравнения движения электропривода основан на том, что на небольшом участке приращения скорости вращения $\Delta\omega$ момент двигателя и момент сопротивлений принимаются постоянными, равными средним значениям на рассматриваемом участке.

Основное уравнение движения электропривода:

$$\frac{M_{дв} - M_c}{J_{сис}} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (4.69)$$

Сущность этого метода заключается в следующем (рисунок 4.5)

1. Задаёмся масштабами по оси моментов (M , Н·м/мм), по оси скорости (ω , рад/с/мм), по оси времени (t , с/мм);
2. Строим естественную механическую характеристики АД с к.з. ротором по 4-м характерным точкам $M_{дв} = f(\omega)$;
3. Строим механическую характеристику вентилятора по уравнению:

$$M_c = 0.2 \cdot M_{сн} + 0.8 \cdot M_{сн} \left(\frac{\omega}{\omega_{сн}} \right)^2 \quad (4.70)$$

где M_c - статический момент сопротивления вентилятора, Н·м;

$M_{сн}$ - момент сопротивления вентилятора при номинальной скорости вращения, Н·м; $\omega_{сн}$ - номинальная скорость вращения электродвигателя, рад/с;

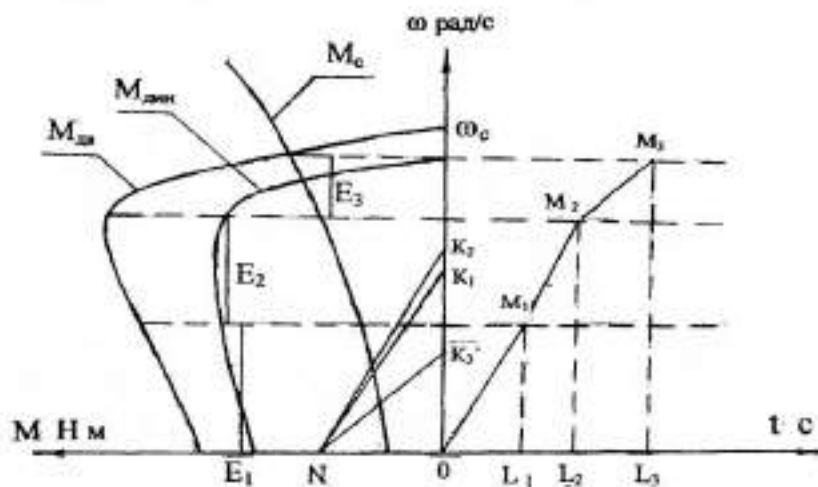


Рисунок 4.5 -Графоаналитический метод определения времени пуска системы «электродвигатель – вентилятор» до установившейся скорости вращения

Вычитая из графика момента двигателя график момента сопротивлений, получаем кривую динамического момента $M_{дин} = f(\omega)$ и разбиваем её на ряд участков, для которых динамический момент можно принять постоянным, т.е. не зависящим от скорости.

При этом нужно стремиться к тому, чтобы площадки, лежащие вне кривой динамического момента, были примерно равны площадкам, лежащим внутри кривой. Далее по оси моментов откладываем отрезок ON , мм, - это в масштабе величина момента инерции системы $J_{сис}$

$$ON = \frac{J_{сис}}{m_j} \quad (4.71)$$

где $J_{\text{сис}}$ - момент инерции системы электродвигатель - вентилятор, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;
 m_J - масштаб момента инерции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{мм}$;

$$J_{\text{сис}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{вен}} \quad (4.72)$$

где $J_{\text{дв}}$ - момент инерции электродвигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ (задаётся в каталоге электродвигателя);

$J_{\text{вен}}$ - момент инерции вентилятора, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$

$$J_{\text{вен}} = 1,2 \cdot J_{\text{дв}} \quad (4.73)$$

Масштаб момента инерции, m_J $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{мм}$, определяется по формуле:

$$m_J = \frac{M_M \cdot M_t}{M_{\text{ш}}} \quad (4.74)$$

Значение динамического момента на первом участке (OE_1) переносим на ось скорости и получаем точку K_1 ($OE_1 = OK_1 = OK_i$). Соединяем точку K_1 с точкой N и из начала координат до конца первого участка проводим прямую OM_1 параллельную NK_1 . Отрезок OL_1 в принятом масштабе представляет собой приращение времени на первом участке ($OL_1 = \Delta t_1$), а отрезок M_1L_1 - приращение скорости ($M_1L_1 = \Delta \omega_1$).

Для определения приращения времени на втором и последующих участках делаем аналогичные построения: перенося на ось скорости значение динамического момента на втором участке, полученную точку соединяем с точкой N, параллельно этой линии из конца первого участка (точка M_1) проводим линию, точка пересечения которой с линией конца второго участка и даёт приращение времени Δt_2 и т.д. Соединив расчётные точки, получаем ломаную кривую изменения скорости вращения во времени $\omega = f_1(t)$.

Время пуска системы $t_{\text{пуск}}$ с, «электродвигатель-вентилятор» определяется:

$$t_{\text{пуск}} = \Sigma \Delta t_1 = m_t \cdot (OL_3) \quad (4.75)$$

Задача 4.7. Определить время пуска системы «АД с короткозамкнутым ротором-вентилятор», если дано:

$M_{\text{сн}} = 0,8 \cdot M_{\text{н}}$; тип АД: АНР100L6: $P_{\text{н}} = 2,2$ кВт; $I_{\text{н}} = 5,58$ А; $n_{\text{с}} = 1000$ об/мин; $n_{\text{н}} = 945$ об/мин; $z_{\text{н}} = 81,5\%$; $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,74$; $i = 6,0$; $m_{\text{п}} = 1,9$; $m_{\text{кр}} = 2,2$; $J_{\text{дв}} = 0,013$ $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Решение:

1. Определяем синхронную скорость вращения $\omega_{\text{с}}$ рад/с, электродвигателя:

$$\omega_{\text{с}} = \frac{p \cdot n_{\text{с}}}{30} \quad (4.76)$$

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ рад/с.}$$

2. Определяем номинальную скорость вращения $\omega_{\text{н}}$ рад/с, электродвигателя

$$\omega_{\text{н}} = \frac{p \cdot n_{\text{н}}}{30} \quad (4.77)$$

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{3,14 \cdot 945}{30} = 98,9 \text{ рад/с.}$$

3. Определяем номинальный момент M_H Н · м, электродвигателя:

$$M_H = 1000 \frac{P_H}{\omega_H} \quad (4.78)$$

$$M_H = 1000 \frac{2,2}{98,9} = 22,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

4. Определяем критический момент $M_{кр}$ Н · м, электродвигателя

$$M_{кр} = m_{кр} \cdot M_H \quad (4.79)$$

$$M_{кр} = 2,2 \cdot 22,2 = 48,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

5. Определяем номинальное скольжение S_H , о.е., электродвигателя

$$S_H = \frac{n_c - n_H}{n_c} \quad (4.80)$$

$$S_H = \frac{1000 - 945}{1000} = 0,055$$

6. Определяем критическое скольжение $S_{кр}$ о.е., электродвигателя

$$S_{кр} = S_H (m_{кр} + \sqrt{m_{кр}^2 - 1}) \quad (4.81)$$

$$S_{кр} = 0,055 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,228$$

7. Определяем критическую скорость вращения $\omega_{кр}$ рад/с, электродвигателя

$$\omega_{кр} = \omega_c (1 - S_{кр}) \quad (4.82)$$

$$\omega_{кр} = 105(1 - 0,228) = 81 \text{ рад/с}$$

8. Определяем пусковой момент $M_{пуск}$ Н · м, электродвигателя

$$M_{пуск} = m_{п} \cdot M_H \quad (4.83)$$

$$M_{пуск} = 1,9 \cdot 22,2 = 42,18 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

9. Строим естественную механическую характеристику электродвигателя по 4-м точкам (рисунок 4.6);

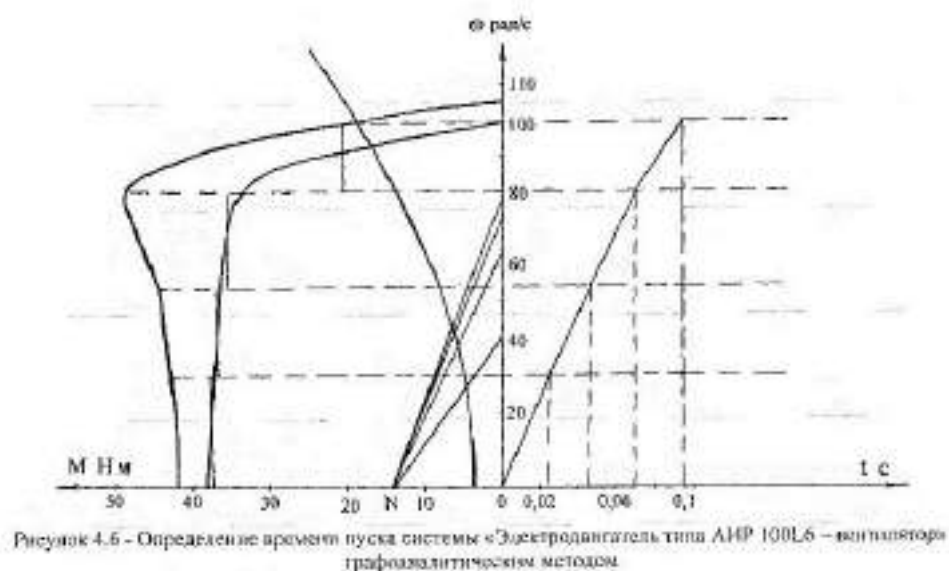
10. Определяем момент сопротивления номинальный $M_{сн}$ Н · м, вентилятора

$$M_{сн} = 0,8 \cdot M_H \quad (4.84)$$

$$M_{сн} = 0,8 \cdot 22,2 = 17,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

11. Задаёмся масштабами:

$$m_{\omega} = 1 \frac{\text{рад/с}}{\text{мм}}; m_M = 0,5 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{мм}}; m_t = 0,002 \frac{\text{с}}{\text{мм}}$$



Строим механическую характеристику вентилятора:

$$M_c = 0.2 \cdot M_{сн} + 0.8 \cdot M_{сн} \left(\frac{\omega}{\omega_{сн}} \right)^2 \quad (4.85)$$

Таблица 4.1

Координаты точек механической характеристики

ω	0	40	80	120
M_c	3,56	5,88	12,85	24,46

12. Разбиваем на 4 участка ось скорости вращения от 0 до $M = M_{сн}$, затем вычитаем из графика $M_{дв}$ график M_c , получаем кривую динамического момента $M_{дин}$, заменяем график динамического момента ступенчатым графиком;

13. Определяем масштаб момента инерции m_J кг · м²/мм, по формуле:

$$m_J = \frac{M_{м} \cdot M_t}{M_{щ}} \quad (4.86)$$

$$m_J = \frac{0,5 \cdot 0,002}{1} = 0,001 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{мм}}$$

14. Определяем момент инерции системы $J_{сис}$ кг · м²

$$J_{сис} = J_{дв} + J_{вен} \quad (4.87)$$

15. Определяем величину отрезка ON, мм

$$ON = \frac{J_{сис}}{m_J} \quad (4.88)$$

$$ON = \frac{0,0286}{0,001} = 28,6 \text{ мм}$$

16. Далее осуществляем построение (см. выше);

17. Замеряем расстояние $OL_1 = 48$ мм;

18. Определяем время пуска:

$$t_{пуск} = m_t \cdot (OL_4) \quad (4.89)$$

$$t_{пуск} = 0,002 \cdot 48 = 0,096 \text{ с;}$$

Некоторые часто встречающиеся числа

$\pi = 3,141593$	$4\pi = 12,56637$	$2/\pi = 0,63662$
$\pi^2 = 9,86960$	$\sqrt{\pi} = 1,77245$	$e = 2,718282$
$\sqrt{2} = 1,41421$	$\sqrt{3} = 1,73205$	$1^\circ = 0,017453$

Приложение Б
(справочное)

Приставки к обозначениям единиц

Тера (Т)	10^{12}	Санتي (с)	10^{-2}
Гига (Г)	10^9	Милли (м)	10^{-3}
Мега (М)	10^6	Микро (мк)	10^{-6}
Кило (к)	10^3	Нано (н)	10^{-9}
Деци (Э)	10^{-1}	Пико (п)	10^{-12}

Приложение В
(справочное)

Единицы физических величин ГОСТ 8.417-81

Наименование величины	Наименование	Обозначение	Выражение через едини- цы СИ
1	2	3	4
Длина	метр	м	м
Масса	килограмм	кг	КГ
Время	секунда	с	с
Сила электрического тока	ампер	А	А
Термодинамическая тем- пература	кельвин	К	А
Температура	градус Цельсия	°С	°С=К
Количество вещества	моль	моль	моль
Сила света	кандела	кд	кд
Плоский угол	радиан	рад	рад
Телесный угол	стерадиан	ср	ср
Площадь	квадратный метр	м ²	м ²
Объём	кубический метр	м ³	м ³
Скорость	метр в секунду	м/с	м/с
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с	рад/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с ²	м/с ²
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	рад/с ²	рад/с ²
Плотность	килограмм на ку- бический метр	кг/м ³	кг/м ³
Удельный объём	кубический метр на килограмм	м ³ /кг	м ³ /кг
Плотность электрическо- го тока	ампер на квадрат- ный метр	А/м ²	А/м ²

Напряжённость магнитного поля	ампер на метр	А/м	А/м
Яркость	кандела на квадратный метр	кд/м ²	кд/м ²
Частота	герц	Гц	с ⁻¹
Сила, вес	ньютон	Н	м · кг · с ² = Дж · м ⁻¹
Давление	паскаль	Па	м ⁻¹ · кг · с ²
Энергия, работа	джоуль	Дж	м ² · кг · с ²
Мощность	ватт	Вт	м ² · кг · с ⁻³ = Дж · с ⁻¹
Количество	кулон	Кл	с · А
Электрическое напряжение	вольт	В	м ² · кг · с ⁻³ · А ⁻¹
Электрическая ёмкость	фарад	ф	м ⁻² · кг ⁻¹ · с ⁴ · А ²
Электрическое сопротивление	ом	Ом	м ² · кг · с ⁻³ · А ⁻²
Электрическая проводимость	сименс	См	м ⁻² · кг ⁻¹ · с ³ · А ²
Магнитный поток	вебер	Вб	м ² · кг · с ⁻² · А ⁻¹
Магнитная индукция	тесла	Тл	кг · с ⁻² · А ⁻¹
Индуктивность	генри	Гн	м ² · кг · с ⁻² · А ⁻²
Световой поток	люмен	лм	кд · ср
Освещённость	люкс	лк	м ⁻² · кд · ср
Момент силы	ньютон-метр	Н · м	м ² · кд · ср ⁻²
Поверхностное натяжение	ньютон на метр	Н/м	кг · с ⁻²
Динамическая вязкость	паскаль-секунда	Па · с	м ⁻¹ · кг · с ⁻¹
Напряжённость электрического поля	вольт на метр	В/м	м · кг · с ⁻³ · А ²
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	фарад на метр	Ф/м	м ⁻³ · кг ⁻¹ · с ⁴ · А ²
Абсолютная магнитная проницаемость	генри на метр	Гн/м	м · кг · с ⁻² · А ⁻²
Удельная энергия	джоуль на килограмм	Дж/кг	м ² · с ⁻²
Теплоёмкость	джоуль на кельвин	Дж/К	м ² · кг · с ⁻² · К ⁻¹
Удельная теплоёмкость	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг · К)	м ² · с ⁻² · К ⁻¹
Поверхностная плотность потока энергии	ватт на квадратный метр	Вт/м ²	кг · с ⁻³
Теплопроводность	ватт на метр-кельвин	Вт/м · К	м · кг · с ⁻³ · К ⁻¹
Энергетическая сила света	ватт на стерадиан	Вт/ср	м ² · кг · с ⁻³ · ср ⁻¹

Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

1	2	3	4
Масса	тонна	т	10^3 кг
Время	минута	мин	60 с
	час	ч	3600 с
	сутки	сут	86400 с
Объём	литр	л	м^3
Плоский угол	градус		$(\rho/180)\text{рад}$ $= 1,7453 \cdot 10^{-2}$
	минута		$(\rho/10800)\text{рад}$ $= 2,9088 \cdot 10^{-4}$
	секунда		$(\rho/6480)\text{рад}$ $= 4,8481 \cdot 10^{-6}$
Оптическая	диоптрия	дптр	$1 \cdot \text{м}^{-1}$
Площадь	гектар	га	$10^4 \cdot \text{м}^2$
Полная мощ-	вольт-ампер	В · А	
Реактивная	вар	вар	
Длина	морская миля	миля	1852 м
	дюйм	ДМ	2,54 см
Масса	карат	кар	
	центнер	Ц	100 кг
Скорость	узел	уз	0,514 м/с
Частота враще-	оборот в секунду	об/с	$1 \cdot \text{с}^{-1}$
	оборот в минуту	об/мин	$1/60 \text{с}^{-1}$ $= 0,016 \text{с}^{-1}$
Давление	миллиметр водяного столба	мм вод. ст.	9,80665 Па
	миллиметр ртутного столба	м рт. ст.	133,322 Па
	атмосфера	ат.	$9,81 \cdot 10^4$ Па
Мощность	лошадиная сила	л.с.	735.499 Вт
Угол поворота	оборот	об	2 π рад = 6,28 рад
Момент инерции (динамический момент)	килограмм - квадратный метр	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$
Яркость	нит	нт	1 кд/м ²
Плотность	килограмм на	кд/м ³	кд/м ³
Магнитодви-	ампервиток	ав	1 А

Приложение Д
(справочное)

Основные технические данные электродвигателей серии АИР основного исполнения

№	Тип электродвигателя	Мощность P_n , кВт	Частота вращения n_n , об/мин	Ток статора I_n , А	КПД η_n , %	$\cos \varphi_n$	$I_{пуск}$ $I_{ном}$	$M_{пуск}$ $M_{ном}$	$M_{макс}$ $M_{ном}$	Параметры схемы замещения, о.е		Момент инерции ротора, $kg \cdot m^2$	Масса кг
										R_1^I	R_2^{II}		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Синхронная частота вращения 3000 об/мин													
1	АИР50А2	0,09	2655	0,30	60,0	0,75	4,5	2,2	2,2	0,15	0,14	0,000025	2,5
2	АИР50В2	0,12	2655	0,39	63,0	0,75	5,0	2,2	2,2	0,11	0,12	0,000028	2,8
3	АИР56А2	0,18	2730	0,52	68,0	0,78	5,0	2,2	2,2	0,17	0,094	0,00042	3,4
4	АИР56В2	0,25	2730	0,70	69,0	0,79	5,0	2,2	2,2	0,16	0,11	0,00047	3,9
5	АИР63А2	0,37	2730	0,91	72,0	0,86	5,0	2,2	2,2	0,14	0,096	0,00075	4,7
6	АИР63В2	0,55	2730	1,31	75,0	0,85	5,0	2,2	2,2	0,13	0,096	0,00095	5,5
7	АИР71А2	0,75	2820	1,75	79,0	0,80	6,0	2,6	2,7	0,12	0,064	0,00095	8,6
8	АИР71В2	1,1	2805	2,55	79,5	0,80	6,0	2,2	2,4	0,13	0,069	0,0011	9,3
9	АИР80А2	1,5	2850	3,3	81,0	0,85	6,5	2,2	2,6	0,084	0,049	0,0018	12,4
10	АИР80В2	2,2	2850	4,6	83,0	0,87	6,4	2,1	2,6	0,076	0,049	0,0021	15,0
11	АИР 90L2	3,0	2850	6,1	84,5	0,88	7,0	2,0	2,2	0,072	0,047	0,0035	19,0
12	АИР100S2	4,0	2850	7,9	87,0	0,88	7,5	2,0	2,4	0,054	0,036	0,0055	25,5
13	АИР100B2	5,5	2850	10,7	88,0	0,89	7,5	2,1	2,4	0,050	0,036	0,0070	31,0
14	АИР112M2	7,5	2895	14,7	88,0	0,88	7,5	2,0	2,2	0,046	0,048	0,010	49,0
15	АИР132M2	11,0	2910	21,1	88,0	0,90	7,5	1,6	2,2	0,040	0,025	0,023	77,5
16	АИР 160S2	15,0	2910	28,5	90,0	0,89	7,0	1,8	2,7	0,052	0,022	0,043	100
17	АИР160M2	18,5	2910	34,5	90,5	0,90	7,0	2,0	2,7	0,019	0,022	0,048	ПО
18	АИР 180S2	22,0	2920	41,5	90,5	0,89	7,0	2,0	2,7	0,030	0,020	0,063	160
19	АИР 180M2	30,0	2925	55,4	91,5	0,90	7,5	2,2	3,0	0,030	0,018	0,076	180
20	АИР200M2	37,0	2940	71,0	91,0	0,87	7,0	1,6	2,8	0,029	0,021	0,12	220
21	АНР200L2	45,0	2940	84,5	92,0	0,88	7,5	1,8	2,8	0,027	0,020	0,13	240
22	АИР225M2	55,0	2940	99,3	92,5	0,91	7,5	1,8	2,6	0,026	0,019	0,20	320
23	АНР250S2	75,0	2940	134,6	93,0	0,91	7,5	1,8	3,0	0,021	0,015	0,47	425
24	АИР250M2	90,0	2940	160,0	93,0	0,92	7,5	1,8	3,0	0,016	0,016	0,52	455
Синхронная частота вращения 1500 об/мин.													
25	АИР50А4	0,06	1335	0,27	53,0	0,63	4,5	2,3	2,2	0,16	0,22	0,000032	2,6
26	АИР50В4	0,09	1335	0,37	57,0	0,65	4,5	2,3	2,2	0,13	0,21	0,000038	3,0
27	АИР56А4	0,12	1350	0,44	63,0	0,66	5,0	2,3	2,2	0,18	0,15	0,00070	3,4
28	АИР56В4	0,18	1350	0,63	64,0	0,68	5,0	2,3	2,2	0,18	0,16	0,00081	3,9
29	АИР63А4	0,25	1320	0,83	68,0	0,67	5,0	2,3	2,2	0,15	0,14	0,0012	4,7
30	АИР63В4	0,37	1320	1,18	68,0	0,70	5,0	2,3	2,2	0,17	0,14	0,0015	5,6
31	АИР71А4	0,55	1350	1,61	75,0	0,73	5,0	2,3	2,4	0,13	0,11	0,0013	8,3
32	АИР71В4	0,75	1350	1,90	75,0	0,80	5,0	2,5	2,6	0,11	0,11	0,0015	9,4
33	АИР80А4	и	1395	2,75	76,5	0,77	5,0	2,2	2,4	0,12	0,068	0,0034	11,9
34	АИР80В4	1,5	1395	3,52	78,5	0,80	5,3	2,2	2,4	0,12	0,061	0,0035	13,5
35	АИР 90L4	2,2	1395	4,98	81,0	0,81	6,5	2,2	2,4	0,098	0,060	0,0056	18,6
36	АИР100S4	3,0	1410	6,70	82,0	0,82	7,0	2,0	2,2	0,078	0,053	0,0085	23,0
37	АИР100L4	4,0	1410	8,52	85,0	0,84	6,0	2,1	2,4	0,067	0,053	0,011	28,5
38	АИР112M4	5,5	1430	11,3	86,0	0,86	6,0	2,0	2,5	0,054	0,041	0,016	49,0
39	АИР132S4	7,5	1440	15,1	87,5	0,86	7,5	2,0	2,5	0,048	0,033	0,027	70,0
40	АИР32M4	11,0	1450	22,2	88,5	0,85	7,5	2,2	3,1	0,043	0,042	0,048	83,5
41	АИР160S4	15,0	1455	28,5	90,0	0,89	7,0	1,9	2,9	0,047	0,025	0,080	100
42	АИР160M4	18,5	1455	34,9	90,5	0,89	7,0	1,9	2,9	0,012	0,024	0,10	145
43	АИР180S4	22,0	1465	42,5	90,5	0,87	7,0	1,7	2,7	0,041	0,021	0,16	170
44	АИР180M4	30,0	1470	57,0	92,0	0,87	7,0	1,7	2,7	0,034	0,018	0,20	190
45	АИР200M4	37,0	1470	68,3	92,5	0,89	7,5	1,7	2,7	0,039	0,018	0,27	245
46	АНР200L4	45,0	1470	83,1	92,5	0,89	7,5	1,7	2,7	0,034	0,017	0,32	270
47	АИР225M4	55,0	1470	101	93,0	0,89	7,0	1,7	2,6	0,027	0,015	0,50	335

48	АМР250S4	75,0	1480	137,8	94,0	0,88	7,5	1,7	2,5	0,025	0,014	1,0	450
49	АИР250M4	90,0	1480	163,0	94,0	0,89	7,5	1,5	2,5	0,024	0,014	1,2	480
50	АИР280S4	110	1470	196	94,0	0,91	6,5	1,6	2,2	0,023	0,019	2,1	695
51	АИР280M4	132	1470	230	94,5	0,93	6,5	1,6	2,4	0,021	0,018	2,4	760
52	АИР315S4	160	1470	286	94,5	0,91	5,5	1,4	2,0	0,018	0,017	3,0	875
53	АИР315M4	200	1470	352	95,0	0,92	5,5	1,6	2,2	0,014	0,014	3,5	1000
54	АИР355S4	250	1470	437	94,5	0,92	7,0	1,5	2,3	0,013	0,013	6,0	1260
55	АИР355M4	315	1470	544	94,7	0,93	7,0	1,6	3,0	0,012	0,014	7,0	1460
Синхронная частота вращения 1000 об/мин													
56	АИР63A6	0,18	860	0,79	56,0	0,62	4,0	2,0	2,2	0,24	0,22	0,0019	4,55
57	АИР63B6	0,25	860	1,04	59,0	0,62	4,0	2,0	2,2	0,18	0,21	0,0023	5,40
58	АИР71A6	0,37	915	1,31	66,0	0,63	4,5	2,1	2,3	0,17	0,15	0,0019	8,1
59	АИР71B6	0,55	915	1,74	69,0	0,68	4,5	1,9	2,2	0,16	0,15	0,0022	9,7
60	АИР80A6	0,75	920	2,26	71,0	0,71	4,0	2,1	2,2	0,16	0,12	0,0033	12,3
61	АИР80B6	1,1	920	3,05	75,0	0,74	4,5	2,2	2,3	0,12	0,11	0,0048	15,3
62	АИР90L6	1,5	925	4,16	76,0	0,72	6,0	2,0	2,2	0,11	0,088	0,0073	19,0
63	АИР100L6	2,2	945	5,58	81,5	0,74	6,0	1,9	2,2	0,09	0,067	0,013	26,5
64	АИР112МА6	3,0	950	7,4	81,5	0,76	6,0	2,0	2,2	0,085	0,063	0,017	43,0
65	АИР112МВ6	4,0	950	9,1	82,5	0,81	6,0	2,0	2,2	0,077	0,062	0,021	48,0
66	АИР132S6	5,5	960	12,3	85,0	0,80	7,0	2,0	2,2	0,067	0,041	0,038	68,5
67	АИР132М6	7,5	960	16,5	85,5	0,81	7,0	2,0	2,2	0,060	0,040	0,055	81,5
68	АНР160S6	11,0	970	22,9	88,0	0,83	6,5	2,0	2,7	0,073	0,030	0,12	125
69	АИР160М6	15,0	970	30,5	88,0	0,85	6,5	2,0	2,7	0,062	0,028	0,15	155
70	АИР180М6	18,5	980	36,9	89,5	0,85	6,5	1,8	2,4	0,056	0,026	0,24	180
71	АИР200М6	22,0	980	44,8	90,0	0,83	6,5	1,6	2,4	0,050	0,024	0,41	225
72	АИР200Б6	30,0	975	59,6	90,0	0,85	6,5	1,6	2,4	0,046	0,022	0,46	250
73	АИР225М6	37,0	980	72,7	91,0	0,85	6,5	1,5	2,3	0,042	0,019	0,64	305
74	АИР250S6	45,0	980	87,0	92,5	0,85	6,5	1,5	2,3	0,037	0,015	1,1	390
75	АИР250М6	55,0	980	105	92,59	0,86	6,5	1,5	2,3	0,034	0,014	1,2	430
76	АИР280S6	75,0	980	137	93,0	0,90	6,5	1,3	2,2	0,032	0,021	2,8	645
77	АИР280М6	90,0	980	164	93,5	0,90	6,5	1,4	2,4	0,030	0,019	3,3	700
78	АИР315S6	ПО	980	200	93,5	0,90	6,0	1,4	2,3	0,026	0,018	4,0	850
79	АИР315М6	132	980	239	94,0	0,90	6,5	1,4	2,3	0,023	0,018	4,5	990
80	АИР355S6	160	980	288	94,0	0,90	6,5	1,7	2,3	0,020	0,015	7,3	ИЗО
81	АИР355М6	200	980	358	94,5	0,90	6,5	1,7	2,0	0,018	0,014	8,8	1280
Синхронная частота вращения 600 об/мин													
82	АИР71B8	0,25	690	1,04	61,0	0,60	4,0	1,8	1,9	0,22	0,23	0,0021	8,9
83	АИР80A8	0,37	700	1,53	63,5	0,59	3,5	2,0	2,3	0,19	0,16	0,0036	12,1
84	АИР80B8	0,55	700	2,07	65,0	0,60	3,5	2,0	2,1	0,17	0,15	0,0047	13,0
85	АИР90LA8	0,75	705	2,08	75,0	0,73	4,0	м	2,0	0,14	0,11	0,0075	18,5
86	АИР90LB8	1,1	700	3,02	77,0	0,72	3,5	1,4	2,0	0,13	0,11	0,0096	22,0
87	АР100L8	1,5	705	3,95	76,0	0,75	3,7	1,6	2,0	0,11	0,093	0,012	23,5
88	АИР112МА8	2,2	710	6,16	76,5	0,71	6,0	1,8	2,2	0,093	0,083	0,017	43,5
89	АИР112МВ8	3,0	700	7,8	79,0	0,74	6,0	1,8	2,2	0,080	0,083	0,025	48,5
90	АИР132S8	4,0	720	10,5	83,0	0,70	6,0	1,8	2,2	0,068	0,058	0,042	68,5
91	АИР132М8	5,5	715	13,6	83,0	0,74	6,0	1,8	2,2	0,070	0,061	0,057	82,0
92	АИР160S8	7,5	730	17,5	87,0	0,75	5,5	1,6	2,4	0,075	0,032	0,12	125
93	АИР160М8	11,0	730	25,5	87,5	0,75	6,0	1,6	2,4	0,066	0,031	0,15	155
94	АИР180М8	15,0	730	31,3	89,0	0,82	5,5	1,6	2,2	0,064	0,030	0,25	180
95	АИР200М8	18,5	730	39,0	89,0	0,81	6,0	1,6	2,3	0,057	0,026	0,41	225
96	АИР200L8	22,0	730	45,9	90,0	0,81	6,0	1,6	2,3	0,062	0,029	0,46	250
97	АИР225М8	30,0	730	62,2	90,5	0,81	6,0	1,4	2,3	0,045	0,022	0,69	305
98	АИР250S8	37,0	735	77,9	92,5	0,78	6,0	1,5	2,3	0,047	0,017	1,2	400
99	АИР250М8	45,0	735	93,6	92,5	0,79	6,0	1,4	2,2	0,037	0,016	1,3	430
100	АИР280S8	55,0	730	106	92,5	0,86	6,0	1,3	2,2	0,035	0,022	3,2	650
101	АИР280М8	75,0	730	141	93,0	0,87	6,0	1,4	2,2	0,028	0,021	4,0	735

102	АИР315S8	90,0	740	173	93,5	0,85	6,0	1,2	2,2	0,023	0,019	4,6	875
103	АИР315M8	110	740	209	93,5	0,85	6,0	1,1	2,2	0,023	0,019	5,6	1010
104	АИР355S8	132	735	252	93,5	0,85	6,0	1,6	2,0	0,023	0,017	9,0	1170
105	АИР355M8	160	735	306	93,5	0,85	6,0	1,6	2,0	0,020	0,017	10,0	1270
Синхронная частота вращения 600 об/мин													
106	АИР250S10	22,0	580	45,8	89,0	0,82	5,0	1,2	2,2	0,050	0,019	1,4	370
107	АИР250M10	30,0	580	61,7	89,0	0,83	5,5	1,2	2,2	0,056	0,023	1,6	410
108	АИР280S10	32,0	580	78,2	91,5	0,79	6,0	1,3	2,3	0,031	0,027	3,7	605
109	АИР280M10	~~45,0	580	94,8	92,0	0,79	6,0	1,4	2,1	0,037	0,031	4,0	660
110	АИР315S10	55,0	585	115	92,5	0,79	6,5	1,2	1,9	0,028	0,026	5,2	785
111	АИР315M10	75,0	585	155	92,5	0,80	6,0	1,2	1,9	0,029	0,027	6,0	865
112	АИР355S10	90,0	590	178	92,5	0,83	6,0	1,1	1,9	0,028	0,021	9,3	1080
113	АИР355M10	110,0	590	217	93,0	0,83	6,0	1,1	1,9	0,024	0,021	11	1190
Синхронная частота вращения 500 об/мин													
114	АИР315S12	45,0	480	101	91,0	0,75	6,0	1Д	1,8	0,037	0,023	5,3	785
115	АИР315M12	55,0	480	123	91,5	0,75	6,0	1,1	1,8	0,033	0,032	6,2	865
116	АИР355S12	75,0	490	164	91,0	0,76	6,0	1,1	1,9	0,026	0,021	9,3	1080
117	АИР355M12	90,0	490	196	92,0	0,76	6,0	1,1	1,9	0,024	0,020	10,0	1190

Примечание: Электродвигатели габаритов (50-132) имеют класс нагревостойкости В;
Электродвигатели габаритов (160 - 355) имеют класс нагревостойкости F.

Основные технические данные электродвигателей с фазным ротором; степень защиты IP45(IP44)

№	Тип электродвигателя	P_n , кВт	Энергетические показатели		$I_{2н}$ А	$E_{2н}$ В	Механическая характеристика		Параметры схемы замещения, о.е	
			КПД, %	$\cos\varphi_{цн}$			m_k	S_n %	R_1^I	R_2^{II}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Синхронная частота вращения 1500 об/мин										
1	АИР0100S4	2,2	75	0,70	22,5	84	2,2	5,2	0,058	0,054
2	АИРФ100Б4	3,0	77	0,78	21,2	91	2,5	5,8	0,052	0,082
3	АИРФ112М4	4,0	80	0,80	24	126	2,5	4,6	0,052	0,012
4	АИРФ132S4	5,5	82	0,82	28	138	2,5	3,6	0,040	0,016
5	АИРФ132М4	7,5	85	0,78	64	185	2,5	3,5	0,032	0,029
6	АИРФ160Б4	11	86	0,86	22	305	2,5	4,4	0,038	0,051
7	АИРФ160М4	15	88	0,87	29	300	2,5	3,7	0,032	0,042
8	АИРФ180М4	18,5	89	0,88	38	295	2,5	2,9	0,022	0,034
9	АИРФ200М4	22	89,5	0,87	45	340	2,5	2,5	0,024	0,026
10	АИРФ200Б4	30	90	0,87	55	350	2,5	2,5	0,026	0,030
11	АИРФ225М4	37	90,5	0,87	160	160	2,5	3,5	0,023	0,027
12	АИРФ250Б4	45	91	0,88	170	230	2,5	3,0	0,020	0,030
13	АИРФ250Б4	55	91,5	0,90	170	200	2,5	2,3	0,017	0,025
14	АИРФ250М4	75	92	0,86	170	250	2,5	2,5	0,015	0,021
15	АИРФ280Б4	90	92,5	0,84	210	250	2,2	4,2	0,022	0,014
16	АИРФ280М4	110	92,5	0,81	223	260	2,2	3,8	0,022	0,017
17	АИРФ315Б4	132	93	0,82	242	280	2,2	3,8	0,020	0,018
18	АИРФ315М4	160	93	0,87	257	310	2,2	3,6	0,017	0,016
19	АИРФ355Б4	200	93,5	0,87	330	300	2,2	3,5	0,014	0,012
20	АИРФ355М4	250	93,5	0,87	400	370	2,2	3,5	0,013	0,010
Синхронная частота вращения 1000 об/мин										
21	АИРФ100L6	1,5	65	0,80	12,8	118	2,5	5,8	0,088	0,072
22	АИРФ112М6	2,2	70	0,87	14,2	135	2,5	5,2	0,067	0,012
23	АИРФ112М6	3,0	72	0,87	12,2	186	2,5	4,8	0,085	0,062
24	АИРФ132Б6	4,0	78	0,88	16,1	262	2,5	4,6	0,074	0,061
25	АИРФ132М6	5,5	81	0,88	17,4	282	2,5	4,4	0,068	0,041
26	АИРФ160Б6	7,5	85	0,77	18	300	2,5	5,1	0,054	0,068
27	АИРФ160М6	11	86	0,76	20	310	2,5	4,3	0,043	0,058
28	АИРФ180М6	15	87,5	0,80	25	325	2,2	4,4	0,035	0,057
29	АИРФ200М6	18,5	88	0,81	35	360	2,5	3,5	0,030	0,038
30	АИРФ200Б6	22	88,5	0,80	45	330	2,5	3,5	0,032	0,041
31	АИРФ225М6	30	89	0,85	150	140	2,5	3,5	0,029	0,030
32	АИРФ250Б6	37	89,5	0,84	165	150	2,5	3,5	0,026	0,024
33	АИРФ250Б6	45	90	0,87	160	180	2,5	2,5	0,029	0,024
34	АИРФ250М6	55	90,5	0,87	182	191	2,5	3,5	0,023	0,026
35	АИРФ280Б6	75	91	0,86	200	210	2,2	3,6	0,031	0,038
36	АИРФ280М6	90	91,5	0,88	270	230	2,2	3,6	0,034	0,031
37	АИРФ315Б6	110	92	0,87	292	291	2,2	3,6	0,036	0,039
38	АИРФ315М6	132	92,5	0,88	300	268	2,2	3,6	0,026	0,018
39	АИРФ355Б6	160	93	0,82	346	290	2,2	3,6	0,024	0,026
40	АИРФ355М6	200	93,5	0,88	400	302	2,2	2,8	0,026	0,028
Синхронная частота вращения 750 об/мин										
41	АИРФ160Б8	5,5	80	0,70	14	300	2,2	6,4	0,060	0,094
42	АИРФ160М8	7,5	82	0,70	16	290	2,2	5,5	0,053	0,079
43	АИРФ180М8	11	85	0,72	25	270	2,2	4,4	0,041	0,062
44	АИРФ200М8	15	86	0,70	28	360	2,2	3,5	0,040	0,048

45	АИРФ200Б8	18,5	86,5	0,73	40	300	2,2	3,5	0,038	0,046
46	АИРФ225М8	22	87	0,82	140	102	2,2	4,5	0,039	0,043
47	АИРФ25088	30	88	0,81	155	125	2,2	4,0	0,033	0,034
48	АИРФ25088	37	89	0,80	155	148	2,2	3,5	0,031	0,031
49	АИРФ250М8	45	89,5	0,78	178	162	2,2	5,0	0,035	0,061
50	АИРФ28088	55	90	0,79	180	185	2,2	4,5	0,036	0,053
51	АИРФ280М8	75	90,5	0,80	221	217	2,2	4,5	0,036	0,052
53	АИРФ315М8	110	91,5	0,81	242	283	2,2	3,8	0,031	0,044
54	АИРФ35588	132	92	0,81	257	330	2,2	3,6	0,031	0,052
55	АИРФ355М8	160	92,5	0,87	330	310	2,2	3,5	0,034	0,050
Основные технические данные электродвигателей с фазным ротором; степень защиты IP23.										
Синхронная частота вращения 1500 об/мин.										
56	АИРНФ200	37	88,5	0,88	62	360	2,5.	3,0	0,029	0,035
57	АИРНФ200Б	45	89	0,88	75	375	2,5	3,5	0,029	0,036
58	АИРНФ225	55	89,5	0,87	200	170	2,5	3,6	0,031	0,035
59	АИРНФ2508	75	90	0,88	250	180	2,5	4,5	0,028	0,039
60	АНРН0250S	90	90,5	0,87	260	220	2,5	4,0	0,021	0,031
61	АИРНФ250	110	91	0,90	260	250	2,5	3,5	0,022	0,031
62	АИРНФ2808	132	91,5	0,88	330	251	2,5	2,9	0,028	0,031
63	АИРНФ280	160	92	0,88	330	300	2,2	2,6	0,024	0,028
64	АИРНФ315S	200	92,5	0,89	396	312	2,2	2,5	0,022	0,026
65	АИРНФ315	250	93	0,90	425	360	2,2	2,5	0,022	0,025
66	АИРНФ3558	315	93,5	0,90	460	420	2,2	2,2	0,020	0,022
67	АИРНФ355	400	94	0,90	485	505	2,2	2,0	0,019	0,020
Синхронная частота вращения 1000 об/мин										
68	АИНФ200М	22	87,5	0,81	37	380	2,2	3,5	0,032	0,043
69	АИРНФ200Б	30	88	0,82	46	375	2,2	4,0	0,032	0,042
70	АИРНФ225	37	88,5	0,86	180	140	2,2 '	4,0	0,032	0,038
71	АИРНФ2508	45	89	0,86	200	155	2,2	4,0	0,028	0,032
72	АИРНФ2508	55	89,5	0,88	185	190	2,2	3,5	0,024	0,027
73	АИРНФ250	75	90	0,85	200	250	2,2	3,0	0,022	0,025
74	АИРНФ2808	90	90,5	0,88	277	202	2,2	3,6	0,033	0,038
75	АИРНФ280	110	91	0,87	297	230	2,2	3,6	0,034	0,038
76	АИРНФ3	132	91,5	0,88	320	257	2 ">	3,0	0,026	0,029
77	АИРНФ3	160	92	0,88	352	291	2,2	3,0	0,024	0,024
78	АИРНФ355Б	200	92,5	0,88	411	304	2,2	5	0,025	0,027
79	АИРНФ355	250	93	0,89	401	380	2,2	2,5	0,022	0,023
Синхронная частота вращения 750 об/мин										
80	АИРНФ200	18,5	85	0,78	30	380	2,2	4,5	0,046	0,054
81	АИРНФ2008	22	86	0,79	40	330	2,2 '	4,5	0,042	0,066
82	АИРНФ225	30	86,5	0,80	165	120	2,2	4,1	0,043	0,046
83	АНРН№250	37	87,5	0,80	190	115	2,2	5,5	0,044	0,047
84	АИРНФ250Б	45	88,5	0,82	190	140	2,2	4,0	0,036	0,040
85	АИРНФ250	55	89,5	0,83	185	190	2,2	3,5	0,029	0,031
86	АИРНФ280Б	75	90	0,84	257	190	2,2	4,0	0,031	0,040
87	АИРНФ280	90	90,5	0,84	267	214	2,2	4,0	0,031	0,040
88	АИРНФ3	110	91	0,84	311	225	2,2	3,5	0,030	0,032
89	АИРНФ3	132	91,5	0,84	364	247	2,2	3,5	0,031	0,031
90	АИРНФ3558	160	92	0,86	353	285	2,2	2,7	0,024	0,026
91	АИРНФ355	200	92,5	0,86	359	350	2,2	2,7	0,022	0,025

Основные технические данные электродвигателей постоянного тока серии 4П

№	Тип электродвигателя	Р _н , кВт	I _н , А	К.П.Д., %
1	2	3	4	5
U _н = 220 В; n _н = 3000 об/мин				
1	4П080А2	0,37	2,9	61,5
2	4П080А2	0,75	4,3	72,0
3	4П080В1	U	5,9	72,0
4	4П0100S1	1,6	9,0	75,0
5	4П0100S2	2,2	12,5	79,0
6	4П0100L1	3,0	17,5	80,0
7	4П0112M2	5,5	24,5	83,0
U _н = 220 В; n _н = 2200 об/мин				
8	4П080А2	0,25	1,8	58,0
9	4П080А2	0,55	2,8	70,0
10	4П080В1	0,75	4,2	67,0
11	4П0100S1	1,1	5,1	74,0
12	4П0100S2	1,5	8,5	76,0
13	4П0100L1	2,2	11,7	76,0
14	4П0112M2	4,0	21,4	79,0
U _н = 220 В; n _н = 1500 об/мин				
15	4П080А2	0,37	2,1	61,5
16	4П080В2	0,55	2,9	66,0
17	4П0100S1	0,75	4,3	70,0
18	4П0100S2	1,1	5,9	75,0
19	4П0100L1	1,5	8,7	74,0
20	4П0112M1	2,2	12,0	74,0
21	4П0112M2	3,0	18,4	74,0
U _н = 220 В; n _н = 1000 об/мин				
22	4П080А2	0,25	1,4	58,0
23	4П080В1	0,37	2,1	65,0
24	4П0100S1	0,55	2,85	65,0
25	4П0100S2	0,75	4,25	66,0
26	4П0100L1	1,1	5,25	68,0
27	4П0112M1	1,5	9,3	71,0
28	4П0П2M2	2,2	13,3	70,0
U _н = 220 В; n _н = 750 об/мин				
29	4П0100S1	0,37	1,95	60,5
30	4П0100S2	0,55	2,9	60,0
31	4П0100L1	0,75	4,2	67,0
32	4П0112M2	1,5	9,75	66,0
U _н = 220 В; n _н = 3000 об/мин				
33	4ПНМ132L04	3,5	16,5	74,0
34	4ПНМ112L04	5,3	21,2	83,0
35	4ПНМ160L04	6,3	26,9	82,0
36	4ФНМ200S04	9,0	36,1	86,0
37	4ПНМ132M04	10,6	44,8	84,0
38	4ПНМ180L04	11,0	47,8	83,0
39	4ПФМ200M04	22,0	78,4	85,5
40	4ПФМ200Б	45,0	216	86,0
41	4ПН225М	48,0	218	87,3
42	4ПФМ225М	55,0	287	87,6
43	4ПФМ225L	63,0	324	88,7
U _н = 220 В; n _н = 2500 об/мин				
44	4ПНМ112L04	0,8	3,9	59,0
45	4ФНМ160L04	4,0	19,1	76,0
46	4ПНМ180L04	5,6	29,4	79,0
47	4ПНМ180S04	7,1	33,6	80,0

48	4F1H225S	16,0	76,0	80,5
49	4ПН225М	20,0	94,6	83,0
50	4F1H225S	22,0	112	83,5
51	4ПН225L	32,0	158	85,0
52	4ПН250L	40,0	202	85,0
53	4ПН250М	48,0	210	85,5
54	4ПФМ250М	55,0	274	87,6
55	4ПФМ250S	75,0	371	88,5
56	4ПФМ250L	90,0	486	88,7
U _н = 220 В; n _н = 1500 об/мин				
57	4ПНМ112М04	2,5	11,5	73,0
58	4ПНМ132М04	4,0	22,2	79,0
59	4ПНМ132L04	5,5	29,4	80,0
60	4ПОМ200S	14,0	73,5	88,0
61	4ПНМ180L04	15,0	84,6	86,0
62	4ПОМ200М	17,0	92,4	89,0
63	4ПНМ200L04	18,5	102	86,0
64	4ПНМ225L04	22,0	128	87,5
65	4ПНМ225М	30,0	164	88,5
66	4ПН280S	34,0	178	84,5
67	4ПН225S	37,0	188	86,5
68	4ПФМ225Б	45,0	217	86,8
69	4ПФМ225М	55,0	287	87,6
70	4ПН250S	60,0	356	87,1
71	4ПФМ225Б	63,0	370	88,7
72	4ПФМ250S	67,0	382	88,2
73	4ПН250М	71,0	380	89,5
74	4ПФМ250М	80,0	405	88,5
75	4ПН280Б	110	508	89,0
76	4ПФМ280S	125	632	87,0
77	4ПФМ280М	140	784	88,4
U _н = 220 В; n _н = 1000 об/мин				
78	4ПНМ132М04	2,5	1,6	71,0
79	4ПНМ132L04	3,15	2,3	74,0
80	4ПНМ180L04	11,0	61,4	83,0
81	4ПНМ200L04	16,0	78,0	86,0
82	4ПФМ200М	22,0	132	85,5
83	4ПФМ225S	26,5	146	83,0
84	4ПФМ225L	45,0	219	85,0
85	4ПН250М	48,0	236	85,5
86	4ПФМ250М	55,0	286	87,5
87	4ПН280S	75,0	385	88,5
88	4ПФМ280S	90,0	480	88,0
89	4ПФМ280L	125	532	88,5
U _н = 220 В; n _н = 750 об/мин				
90	4ПНМ160М04	3,0	18,2	75,0
91	4ПОМ200S	6,0	39,5	81,5
92	4ПНМ180L04	7,1	48,2	80,0
93	4ПН225S	16,0	63,0	80,5
94	4ПФМ200М	18,5	104	82,5
95	4ПФМ225Б	21,0	131	80,1
96	4ПФМ225L	22,0	136	82,0
97	4ПФМ225М	27,0	164	82,0
98	4ПН250М	32,0	174	84,0
99	4ПФМ250L	33,5	180	82,3
100	4ПФМ250М	42,0	222	84,5
101	4ПН280S	45,0	245	87,0
102	4ПН280М	55,0	286	87,5
103	4ПФМ280М	71,0	346	88,0
U _н = 220 В; n _н = 600 об/мин				
104	4ПН225S	12,5	78	79,5
105	4ПН225М	15,0	94	79,0
106	4ПФМ225S	18,0	106	78,0

107	4ПФМ225М	20,0	128	79,0
108	4ПН225250М	24,0	134	82,0
108	4ПН225250М	24,0	134	82,0
109	4ПФМ225L	26,5	140	79,5
110	4ПН280S	34,0	172	84,5
111	4ПН280М	37,0	184	85,5
112	4ПФМ280S	45,0	223	87,5
113	4ПФМ280М	55,0	287	87,5
U _н = 220 В; n _н = 500 об/мин				
114	4ПН225S	8,5	48	77,0
115	4ПФМ225L	20,0	106	75,0
116	4ПФМ250L	36,0	174	85,0
117	4ПФМ280L	55,0	288	88,0

Список литературы

1. Электрический привод : учебник / Георгий Борисович Онищенко Г. Б. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с. : ил. - Библиогр.: с. 307.
2. Красовский, А.Б. Основы электропривода [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Б. Красовский. — Электрон. дан. — Москва : , 2015. — 405 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/106384>
3. Красовский, А.Б. Расчет характеристик электропривода [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Б. Красовский. — Электрон. дан. — Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. — 36 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/52245> Бастрон А.В. и др. Электропривод. Лабораторный практикум. Красноярск.: КрасГАУ, 2005, 228 с.
4. Маругин А.П. Основы электропривода [Текст] : учебно-методические указания к расчетным заданиям для студентов всех форм обучения по направлению подготовки бакалавриата 15.03.02 - "Технологические машины и оборудование" / А. П. Маругин ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский государственный горный университет. - Екатеринбург : УГГУ, 2018. - 26 с.
5. ГОСТ 8.417-81. Единицы физических величин: М.: Изд-во стандартов, 1981, 40 с.
6. ГОСТ 2.105-95. Общие требования к текстовым документам: Минск.: ИПК Изд-во стандартов, 1998, 36 с.
7. Двигатели постоянного тока серии 4П /Сводный отраслевой каталог Информэлектро. М.: Информэлектро, 1993, 28 с.
8. Епифанов А.П. Основы электропривода, СПб.: Лань, 2008. 191 с.
9. Епифанов А.П., Гущинский А.Г., Малайчук Л.М. Электропривод в сельском хозяйстве, СПб.: Лань, 2010. 223 с.
10. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В, Электропривод. Энерго- и ресурсосбережение. М.: Академия, 2008. 202 с.
11. Коломиец А.П. и др. Электропривод и электрооборудование, М.: КолосС, 2008. 328 с.
12. Левин А.А. Самоучитель работы на компьютере. 5 изд. М.: Нолидж, 1999. 617 с.
13. Москаленко В.В. Электрический привод. М.: Академия, 2007. 361 с.
14. Рычкова Л.П. Электропривод. Примеры решения типовых задач: Учебное пособие рекомендованное УМО.- Иркутск.: ИрГСХА, 2004, 102 с.
15. Унифицированная серия асинхронных двигателей ИНТЕР- ЭЛЕКТРО./ Под редакцией доктора технических наук В.И. Радина. М.: Энергоатомиздат, 1990. 67 с.
16. Шичков Л.П. Электрический привод, М.: КолосС, 2006. 279.



Проректор по учебно-методическому комплексу
С.А. Упоров

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ И РАСЧЕТНО-
ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ
Б1.О.26 ГИДРОМЕХАНИКА**

Направление
15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль
Мехатроника и робототехника промышленных производств

Авторы: Двинин Л.А., доцент, к.т.н., Двинина Л. Б., доцент, к.т.н.

Одобрена на заседании кафедры

Технической механики
(название кафедры)

Зав. кафедрой

Волков Е.Б.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 15.09.2023
(Дата)

Рассмотрена методической комиссией
факультета

Горно-механического
(название факультета)

Председатель

Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 20.10.2023
(Дата)

Екатеринбург

Методические указания адресованы студентам, обучающимся по направлению подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника, и призваны обеспечить эффективную самостоятельную работу по курсу «ГИДРОМЕХАНИКА».

Форма контроля самостоятельной работы студентов – проверка на практическом занятии, контрольные работы, зачет.

ФОРМЫ И СОДЕРЖАНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Расчетно-графическая работа

Расчетно-графические работы выполняются по методической литературе, изданной кафедрой:

Часс С. И. [Текст]: Гидромеханика. Сборник задач. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – 145 с.

Часс С. И. [Текст]: Гидравлика. Гидромеханика. Сборник задач и контрольных заданий. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2009. – 137 с.

Номера вариантов берутся по номеру в списке группы или назначаются преподавателем, номера заданий берутся по таблице.

Методические рекомендации для решения задач и примеры для самостоятельного решения приведены в учебных пособиях:

Бибенина Т.П.: Гидромеханика: Конспект лекций. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. – 224 с.

Часс С. И.: Гидравлика, гидромеханика. Механика жидкости и газа. Учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. – 215 с.

Тематика расчетно-графических работ:

1. Определение давления в точке жидкости, приборы для измерения давления. Гидростатический закон распределения давления, закон Паскаля.
 2. Аналитический метод и графоаналитический метод определения силы на плоские поверхности.
 3. Определение силы давления на криволинейные поверхности, закон Архимеда.
 4. Ламинарный и турбулентный режимы движения, гидравлические сопротивления, расчет простых коротких трубопроводов.
 5. Элементы расчетов сложных трубопроводных систем.
- Для подготовки к практическим занятиям преподаватель может привлекать дополнительную литературу, а также раздаточный материал.

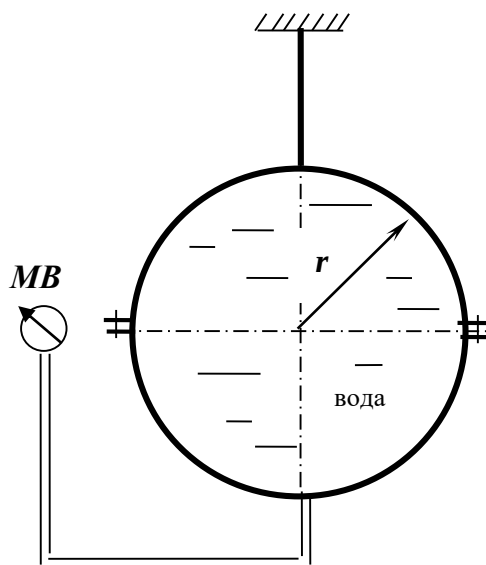
Подготовка к контрольной работе проводится студентом самостоятельно в рамках часов, выделенных на самостоятельную работу в учебном плане.

Контрольная работа № 1

1. Дать понятие вязкости жидкости. Представить коэффициенты, характеризующие вязкость жидкости, единицы измерения коэффициентов. Записать закон Ньютона.
2. Представить давление $p=720$ мм рт. ст. в единицах измерения системы СИ.
3. Определить какое давление – манометрическое или вакуум – показывает мановакуумметр, если абсолютное давление в измеряемой области равно 68 кПа. Величину давления представить в барах.
4. Определить давление в резервуаре, заполненном водой, на глубине $h = 1,2$ м, если избыточное давление на поверхности жидкости $p_{изб}=62$ кПа.
5. Сформулировать закон Архимеда.

Задача

Шаровой сосуд радиусом $r = 0,4$ м, заполненный водой, висит на тяге, прикрепленной к его верхней половине. Найти давление в центре сосуда (показание пружинного мановакуумметра MB), при котором нижнюю половину сосуда, имеющую силу тяжести $G = 1500$ Н, можно не закреплять. Каким должно быть показание прибора, если силу тяжести не учитывать?

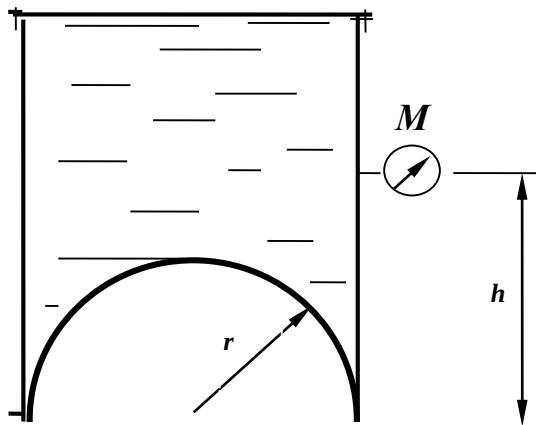


Контрольная работа № 2

1. Записать формулу связи коэффициентов вязкости: динамического μ и кинематического ν .
2. Представить давление $p = 1,2$ ат в единицах измерения системы СИ.
3. Определить абсолютное давление в резервуаре, заполненном воздухом, если показание вакуумметра, установленного на резервуаре, равно $p_{\text{вак}} = 0,6$ ат.
4. Определить каким будет показание манометра (в бар), установленного на глубине $h = 1,2$ м открытого резервуара, заполненного бензином. Плотность бензина $\rho_{\text{б}} = 700 \text{ кг/м}^3$.
5. Записать дифференциальные уравнения равновесия жидкости.

Задача

Определить силу давления воды на полусферическое дно резервуара радиуса $r = 1$ м, если показание манометра M , установленного на расстоянии $h = 1,3$ м, равняется $p_{\text{ман}} = 0,2$ бар.

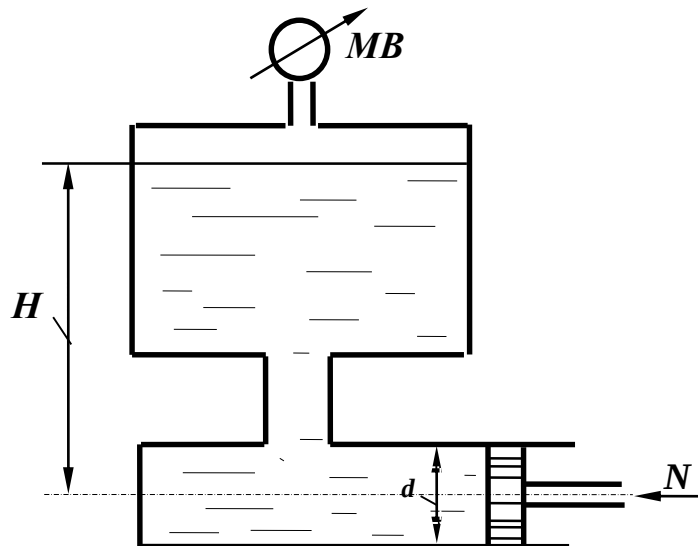


Контрольная работа № 3.

1. Дать понятие физического свойства жидкости *сжимаемость*. Привести формулу коэффициента объемного сжатия.
2. Представить давление $p = 196$ кПа в атмосферах технических (ат).
3. Манометрическое давление в измеряемой области равно $p_{\text{ман}} = 32$ кПа. Записать величину абсолютного давления в области измерения.
4. Избыточное давление на поверхности масла в закрытом резервуаре равно $p_{\text{изб}} = 0,13$ ат. На какой глубине h установлен манометр, если его показание равно $p_{\text{ман}} = 0,31$ ат; плотность масла $\rho_m = 900$ кг/м³.
5. Записать гидростатический закон распределения давления.

Задача

Определить усилие N , которое надо приложить к штоку поршня для удержания его на месте, если показание мановакуумметра $p_{\text{мв}} = 0,5$ ати, диаметр штока $d = 100$ мм, высота уровня масла над осью штока $H = 1,5$ м, плотность масла $\rho_m = 800$ кг/м³.

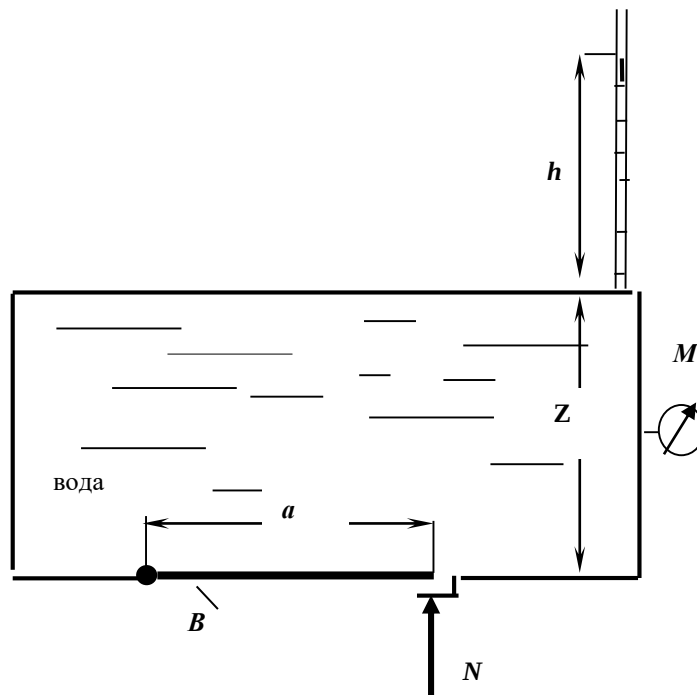


Контрольная работа № 4

1. Дать понятие физического явления *кавитация*.
2. Представить давление $p = 500$ мм рт.ст. в единицах измерения системы СИ.
3. Вакуумметрическое давление в измеряемой области равно $p_{\text{вак}} = 38$ кПа, записать величину абсолютного давления в области измерения.
4. Определить, каким должно быть давление на поверхности масла закрытого резервуара, если показание манометра на глубине $h = 0,8$ м равно $p_{\text{ман}} = 0,12$ ат. Плотность масла принять равной $\rho_m = 900$ кг/м³.
5. Сформулировать закон Паскаля.

Задача

Определить показание манометра M в центре боковой стенки резервуара с водой, а также усилие N , приложенное к запорному устройству плоской квадратной крышки B при следующих данных: $Z = 3$ м; $h = 2$ м; $a = 1$ м.

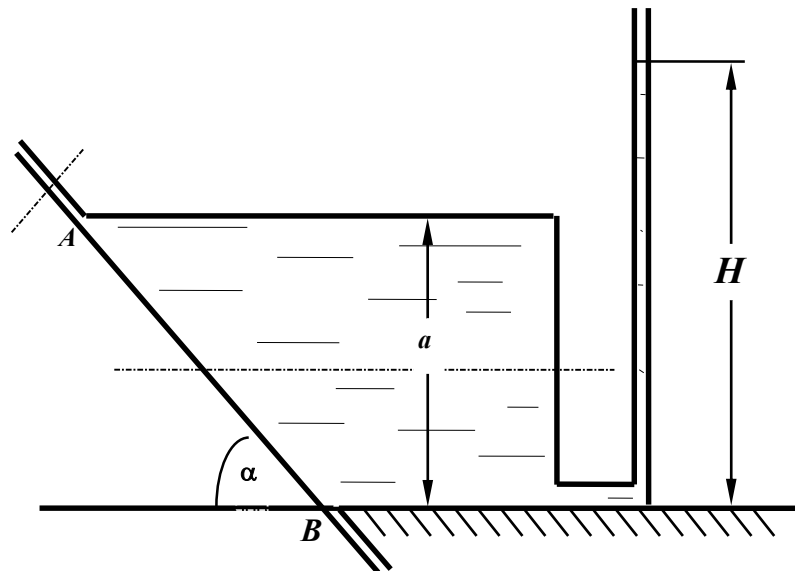


Контрольная работа № 5

1. Дать понятие гидростатического давления. Свойства гидростатического давления. Единицы измерения давления в системе СИ.
2. Представить давление $p = 200$ мм рт. ст. в Па.
3. Определить, какое давление, манометрическое или вакуум, показывает мановакуумметр и его величину, если абсолютное давление в измеряемой области равно $p_{\text{абс}} = 0,8$ ат.
4. Определить, каким будет показание мановакуумметра на глубине $h = 2,2$ м закрытого резервуара, заполненного водой, если на поверхности жидкости действует вакуумметрическое давление $p_{\text{вак}} = 0,1$ ат.
5. Дать определение свойства жидкости *вязкость*.

Задача

Определить силу давления на крышку маслобака AB , если показание пьезометра $H = 400$ мм, угол наклона крышки $\alpha = 45^\circ$. В сечении бак имеет форму квадрата со стороной $a = 200$ мм. Плотность масла $\rho_m = 900$ кг/м³.

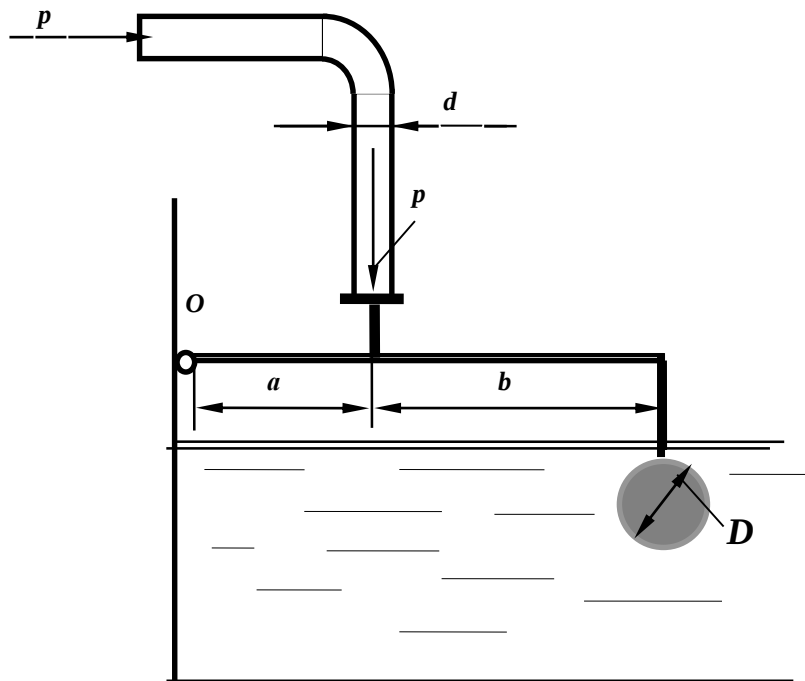


Контрольная работа № 6

1. Дать понятие плоскости уровня, представить уравнение плоскости уровня.
2. Представить перевод давления $p = 1,2$ ат в м вод.ст., в Па.
3. Дать понятие абсолютного давления. Записать абсолютное давление при манометрическом давлении $p_{\text{ман}} = 32$ кПа.
4. Показание манометра на определенной глубине в открытом резервуаре с водой равно $p_{\text{ман}} = 0,14$ ат. Определить, как изменится показание манометра на той же глубине, если резервуар заполнить маслом плотностью $\rho_m = 800$ кг/м³.
5. Нарисовать схему пьезометра для измерения абсолютного давления.

Задача

Вода, подаваемая под давлением $p = 2,5$ ати по трубе $d = 150$ мм, заполняет резервуар. Определить минимально необходимый диаметр D шарообразной поплавок, обеспечивающий автоматическое закрытие клапана при наполнении резервуара, если: $a = 100$ мм; $b = 500$ мм. Собственным весом рычага, клапана и поплавок пренебречь



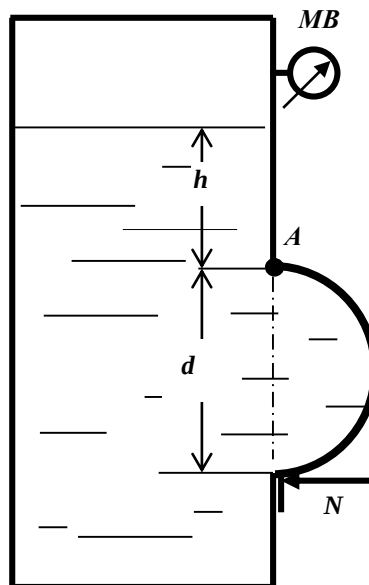
Контрольная работа № 7

1. Записать основное уравнение гидростатики, пояснить все входящие в него параметры.
2. Представить давление $p = 1,6$ ат в единицах измерения системы СИ.
3. Дать понятие абсолютного давления. Записать величину абсолютного давления при вакуумметрическом давлении $p_{\text{вак}} = 38$ кПа.
4. Показание манометра на определенной глубине открытого резервуара, заполненного бензином плотностью $\rho_{\text{бен}} = 700$ кг/м³, равно $p_{\text{ман}} = 0,12$ ат. Как изменится показание манометра на той же глубине, если резервуар заполнить маслом плотностью $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³.
5. По какой формуле следует определять силу давления жидкости на плоскую стенку, если на свободной поверхности жидкости действует абсолютное давление p_0 больше атмосферного, а не смоченная сторона стенки находится под атмосферным давлением?

Задача

Закрытый резервуар заполнен дизельным топливом с плотностью $\rho = 846$ кг/м³. В вертикальной стенке резервуара имеется прямоугольное отверстие, закрытое полуцилиндрической крышкой. Она может поворачиваться вокруг горизонтальной оси в точке A . Пренебрегая силой тяжести крышки, определить усилие N , которое нужно приложить к крышке, чтобы она не открывалась при следующих данных: $p_{\text{МВ}} = 11,4$ кПа; $d = 1$ м; $h = 1$ м; $b = 1,2$ м.

Размер b перпендикулярен плоскости чертежа.

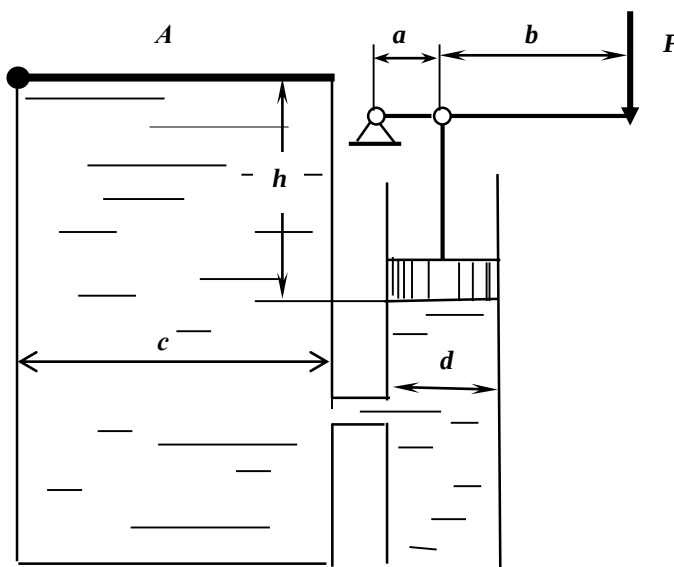


Контрольная работа № 8

1. Записать гидростатический закон распределения давления. Дать определение геометрического и пьезометрического напоров.
2. Представить давление $p = 196$ кПа в технических атмосферах (ат).
3. Определение абсолютного давления. Чему равно абсолютное давление при манометрическом давлении $p_{\text{ман}} = 62$ кПа.
4. Показание манометра, установленного на закрытом резервуаре, заполненном маслом плотностью $\rho_{\text{мас}} = 800$ кг/м³, равно $p_{\text{ман}} = 0,12$ ат. Рассчитать, какой должна быть высота уровня масла в пьезометре, выведенном на уровне установки манометра.
5. Дать понятие тела давления, на примерах пояснить различные тела давления.

Задача

К рычагу гидроусилителя приложена сила F . Определить силу давления жидкости с плотностью $\rho = 900$ кг/м³ на квадратную крышку A при следующих данных: $F = 180$ Н; $d = 40$ мм; $c = 1$ м; $h = 1$ м; $a = 10$ мм; $b = 40$ мм.

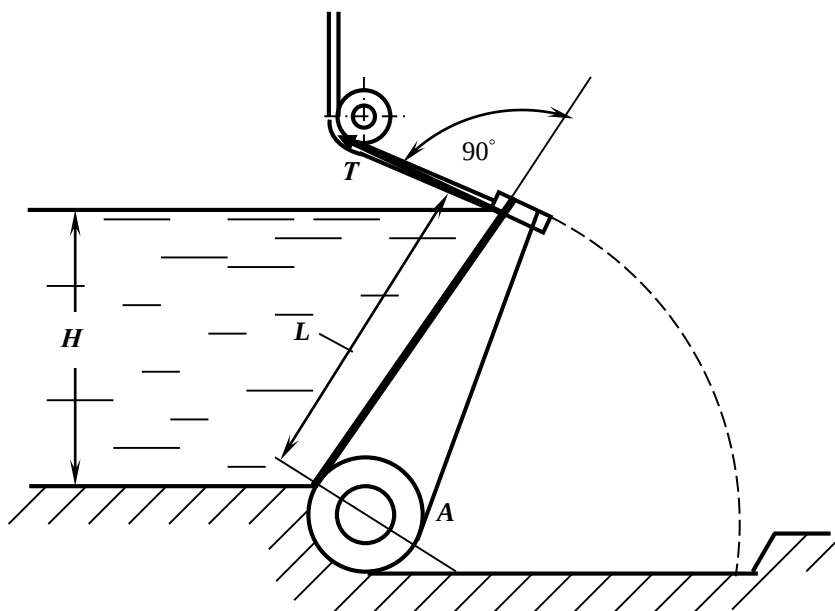


Контрольная работа № 9

1. Понятие гидростатического давления. Расчетная формула давления. Единицы измерения давления.
2. Представить давление, равное $p = 12$ м вод. ст., в единицах измерения системы СИ.
3. Абсолютное давление в измеряемой области равно $p_{\text{абс}} = 0,38$ ат. Установить, каким прибором следует пользоваться для измерения давления, рассчитать его величину в системе СИ.
4. Определить давление на поверхности жидкости закрытого резервуара, если показание ртутного U-образного манометра, установленного на глубине $h = 1,5$ м равно $p = 100$ мм рт.ст.
5. Какой зависимостью выражается гидростатический напор?

Задача

Плоский прямоугольный затвор с размерами $L = 2,5$ м и $B = 10$ м создает подпор воды $H = 2,3$ м. Затвор может вращаться относительно оси шарнира A . Определить силу натяжения троса T , удерживающую затвор в заданном положении. Размер B перпендикулярен плоскости чертежа



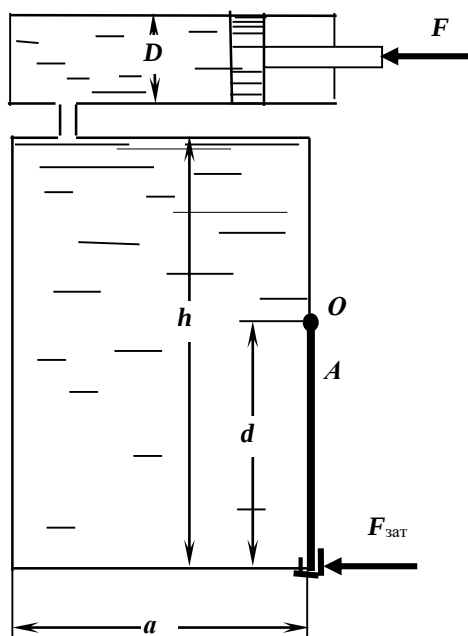
Контрольная работа № 10

1. Понятие физического свойства **вязкость**. Коэффициенты, характеризующие вязкость, единицы их измерения.
2. Перевести давление, равное 12 м вод.ст., в мм рт.ст.
3. Дать понятие абсолютного давления. Записать величину абсолютного давления в измеряемой области, если показание манометра в этой области равно $p_{\text{ман}} = 0,8$ ат.
4. Вакуумметрическое давление на поверхности воды в закрытом резервуаре равно $p_{\text{вак}} = 0,6$ ат. Установить, каким прибором следует измерить давление на глубине $h = 1,5$ м и рассчитать его величину.
5. Как расположена линия действия силы избыточного (весового) давления жидкости, действующей на плоскую фигуру любой формы?

Задача

Жидкость в емкости « $a \cdot h$ » нагревается до температуры 20°C . Определить усилие F , которое требуется приложить к поршню расширительного цилиндра диаметром D , чтобы сохранился прежний объем жидкости?

Также найти усилие $F_{\text{зат}}$, на которое должен быть рассчитан затвор круглой крышки диаметром d при следующих данных: плотность $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $d = 500 \text{ мм}$, $D = 260 \text{ мм}$, $h = 2 \text{ м}$, $a = 1,5 \text{ м}$; $\beta_T = 150 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$; $\beta_p = 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

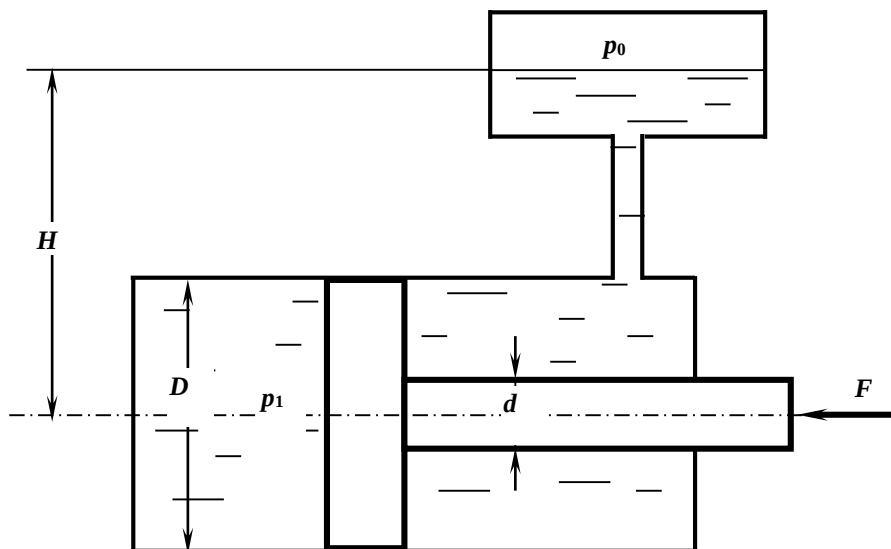


Контрольная работа № 11

1. Понятие *плоскости уровня*. Уравнение плоскости уровня. Значение параметров, входящих в уравнение.
2. Представить перевод давления $p = 100$ мм рт. ст. в единицах измерения системы СИ.
3. Записать величину абсолютного давления в измеряемой области, если показание вакуумметра в этой области $p_{\text{вак}} = 0,6$ ат.
4. Вакуумметрическое давление на поверхности закрытого резервуара равно $p_{\text{вак}} = 0,1$ ат. Установить каким прибором следует измерить давление на глубине $h = 3,0$ м и рассчитать его величину.
5. Размерность кинематического коэффициента вязкости в системе СИ

Задача

Определить давление жидкости p_1 в гидроцилиндре, необходимое для преодоления усилия на штоке F при следующих данных: $F = 10$ кН; диаметр поршня $D = 160$ мм; диаметр штока $d = 80$ мм; $p_0 = 20$ кПа, $H = 10$ м; $\rho = 900$ кг/м³.

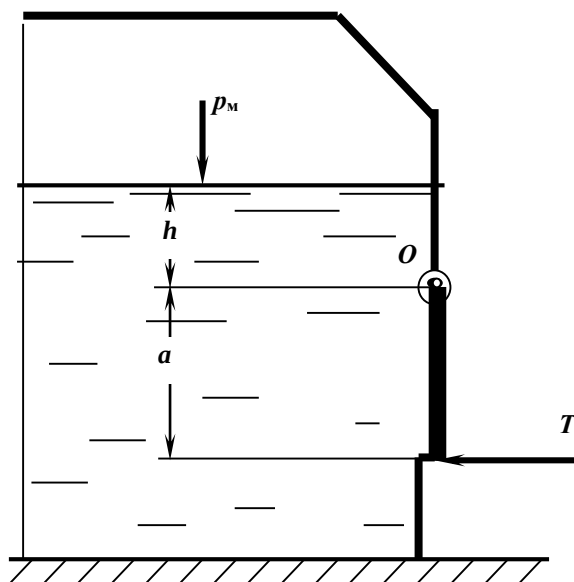


Контрольная работа № 12

1. Записать гидростатический закон распределения давления. Дать понятие геометрического и пьезометрического напоров.
2. Представить давление $p = 68$ кПа в м вод. ст.
3. Абсолютное давление в измеряемой области равно $p_{\text{абс}} = 198$ кПа. Установить, каким прибором следует пользоваться для измерения давления и рассчитать показание этого прибора.
4. Показание манометра на глубине $h = 1,5$ м закрытого резервуара, заполненного водой, равно $p_{\text{ман}} = 0,121$ ат. Определить, каким будет показание манометра на той же глубине, если резервуар будет заполнен маслом. Плотность масла равна $\rho_{\text{мас}} = 800$ кг/м³.
5. Записать дифференциальные уравнения равновесия жидкости; пояснить параметры, входящие в уравнения.

Задача

Усилие T удерживает плоскую квадратную крышку со стороной a в закрытом положении. Определить предельно допустимое значение избыточного давления над уровнем жидкости p_m , при котором крышка остается в закрытом положении, при следующих данных: $T = 2100$ Н, $a = 50$ см, $h = 2$ м, $\rho = 1000$ кг/м³.

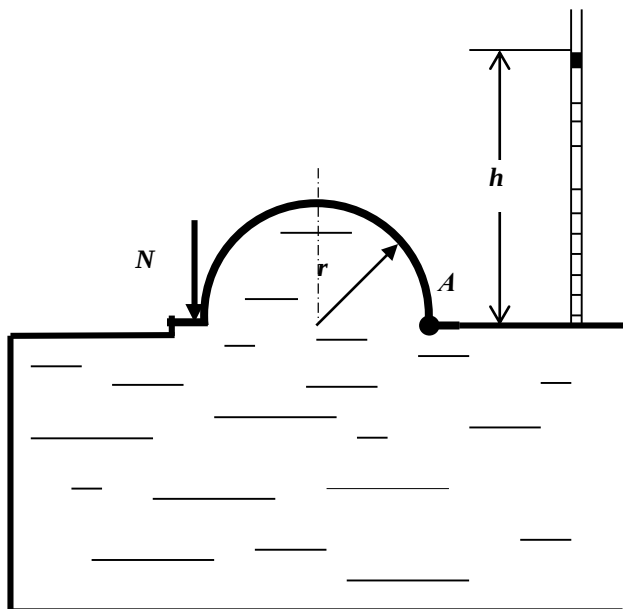


Контрольная работа № 13

1. Понятие физического свойства жидкости *капиллярность*.
2. Представить давление $p = 300$ мм рт.ст. в единицах измерения системы СИ.
3. Показание манометра в измеряемой области равно $p_{\text{ман}} = 0,12$ ат. Представить расчет абсолютного давления в этой области и его величину в системе СИ.
4. В закрытом резервуаре, заполненном бензином, показание манометра на некоторой глубине составляет $p_{\text{ман}} = 0,07$ ат. Определить пьезометрическую высоту, соответствующую этому давлению: $\rho_{\text{б}} = 700$ кг/м³.
5. Каковы единица измерения *динамической вязкости* ?

Задача

Определить усилие N , которое нужно приложить к цилиндрическому затвору, установленному на квадратном отверстии крышки резервуара с водой, при следующих данных: $h = 1$ м, $r = 0,2$ м. Затвор поворачивается вокруг шарнира в точке A .

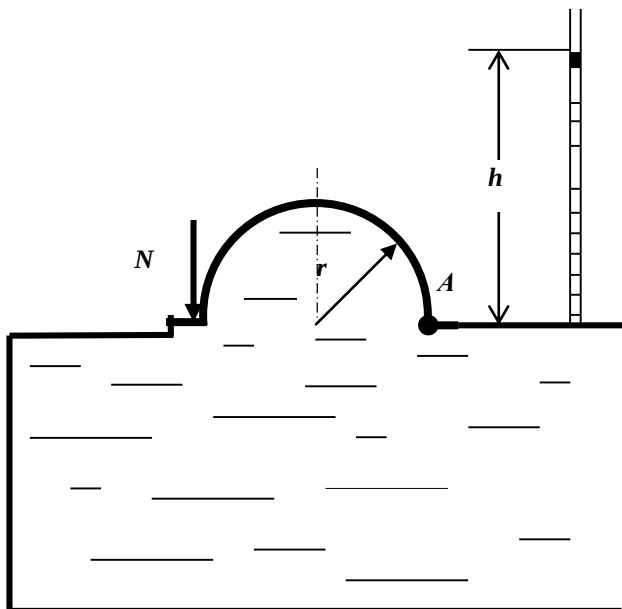


Контрольная работа № 14

1. Представить *основное уравнение гидростатики*, дать определение, пояснить значение входящих параметров.
2. Представить давление $p = 730$ мм рт.ст. в ат.
3. Абсолютное давление в измеряемой области равно $p_{\text{абс}} = 68$ кПа. Определить, каким будет показание мановакуумметра, установленного в этой области, и величину давления.
4. В закрытом резервуаре, заполненном маслом, показание манометра на определенной глубине составляет $p_{\text{ман}} = 0,06$ ат. Определить какой будет пьезометрическая высота (напор) на уровне установки манометра. Плотность масла принять $\rho_m = 800$ кг/м³.
5. Дать определение свойства жидкости *сжимаемость*.

Задача

Запорное устройство полусферической крышки радиусом r рассчитано на усилие N . Определить показание манометра в центре боковой стенки при максимально допустимом давлении в жидкости плотностью $\rho = 900$ кг/м³: $N = 90$ кН, $a = 3$ м, $r = 0,4$ м.



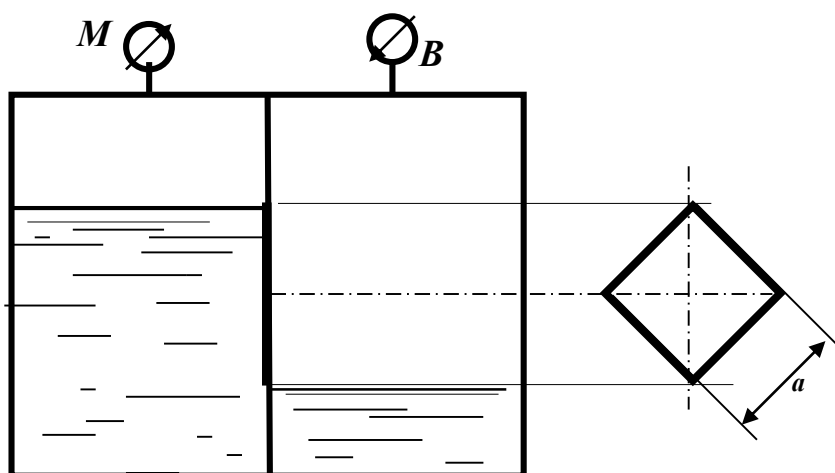
Контрольная работа № 15

1. Записать уравнения Эйлера для равновесного состояния жидкости. Пояснить параметры, входящие в уравнение.
2. Показание манометра на глубине $h = 2,5$ м закрытого резервуара, заполненного водой, равно $p_{\text{ман}} = 0,32$ ат. Определить, каким будет показание манометра на той же глубине, если резервуар будет заполнен маслом. Плотность масла равна $\rho_{\text{мас}} = 800$ кг/м³.
3. Определить показание механического вакуумметра (в ат), установленного на воздушном резервуаре, если показание ртутного вакуумметра, присоединенного к тому же резервуару, составляет 0,2 м.
4. В чем физический смысл понятия *гидростатического давления*.
5. Какие силы действуют в жидкости?

Задача

Замкнутый резервуар с нефтью ($\rho = 900$ кг/м³) разделен на две части плоской перегородкой, имеющей квадратное отверстие со стороной $a = 1$ м. Давление над нефтью в левой части резервуара определяется показанием манометра $p_M = 0,15$ ат, а в правой – показанием вакуумметра $p_B = 0,2$ ат.

Найти величину силы давления, действующей на крышку, закрывающую отверстие в перегородке, и точку ее приложения.

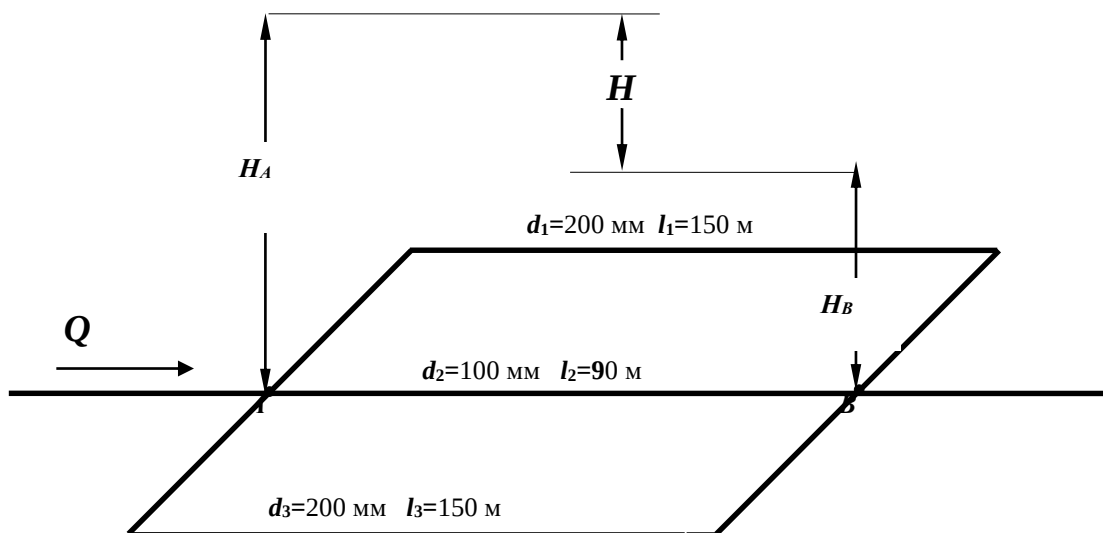


Контрольная работа № 16

1. Какое движение жидкости называется установившимся?
2. Определить диаметр трубы для пропуска воды с расходом $Q = 2,0$ л/с при скорости $V = 1,0$ м/с.
3. Рассчитать коэффициент сопротивления вентиля $\zeta_{\text{вент}}$, если потери напора в нем составляют $h_{\text{вент}} = 0,25$ м при скорости $V = 0,5$ м/с.
4. Записать уравнение Бернулли для целого потока реальной жидкости, представить диаграмму уравнения.
5. Определить режим движения жидкости в трубе $d = 100$ мм, шероховатостью $\Delta = 0,05$ мм при скорости движения $V = 0,21$ м/с. Коэффициент кинематической вязкости жидкости $\nu = 0,7 \times 10^{-6}$ м²/с. Для турбулентного режима проверить область сопротивления.

Задача

Определить расход воды, подводимый к системе параллельно соединенных труб, если действующий напор $H = 10$ м. Трубы стальные, новые. Местными потерями пренебречь.

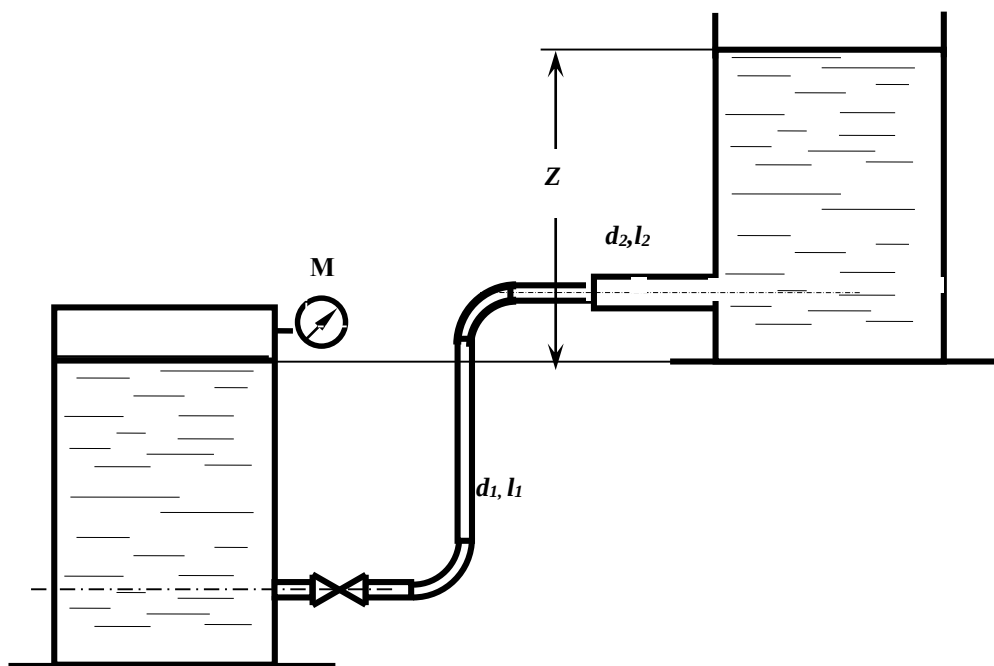


Контрольная работа № 17

1. Какое движение жидкости называется равномерным?
2. Определить скорость движения воды в трубе диаметром $d_1 = 50$ мм, если при постоянном расходе скорость в трубе $d_2 = 100$ мм равна $V_2 = 1,0$ м/с.
3. Геометрический смысл уравнения Бернулли для идеальной жидкости. Диаграмма уравнения.
4. Определить потери напора в пробковом кране $h_{кр}$, если коэффициент сопротивления крана $\zeta_{кр} = 17,0$, а скорость движения воды $V = 1,2$ м/с.
5. Определить потери напора при подаче воды по трубопроводу $d = 200$ мм и длиной $l = 1500$ м при скорости потока $V = 13,1$ см/с и температуре 10°C ($\nu = 0,0131$ см²/с). Трубы стальные, новые ($\Delta = 0,05$ мм).

Задача

Определить максимально возможную высоту наполнения верхнего резервуара Z из нижней емкости при расходе воды $Q = 8$ л/с по двум коротким трубам $d_1 = 100$ мм, $l_1 = 40$ м, $d_2 = 150$ мм, $l_2 = 60$ м при показании манометра $p_M = 50$ кПа; $\nu = 0,01$ Ст; $\Delta = 0,1$ мм; пробковый кран закрыт на 30° .

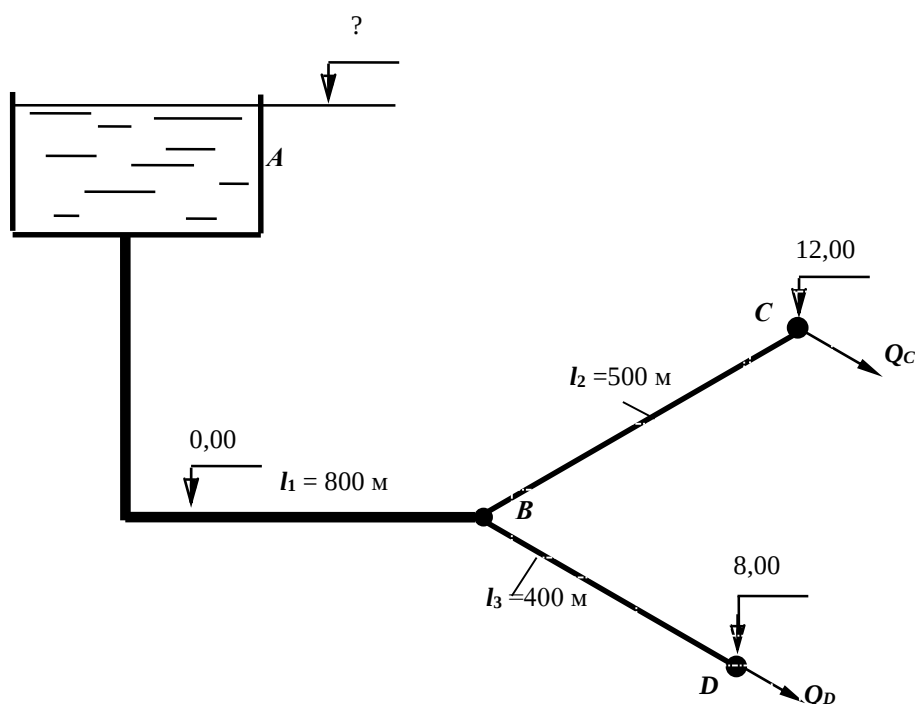


Контрольная работа № 18

1. Какой трубопровод называется коротким?
2. Рассчитать расход воды в трубе $d = 100$ мм при скорости $V = 1,27$ м/с.
3. Как экспериментально определяется скоростной напор и рассчитывается скорость в точке потока? Нарисовать схему прибора.
4. Какие гидравлические сопротивления называются местными? Привести расчетную формулу определения потерь напора в местных сопротивлениях.
5. Определить режим движения жидкости в трубе $d = 100$ мм и шероховатостью $\Delta = 0,05$ мм при пропускной способности $Q = 1,6$ л/с, если коэффициент кинематической вязкости $\nu = 0,7 \times 10^{-6}$ м²/с. Для случая турбулентного режима движения установить область сопротивления.

Задача

Из напорного бака *A* идет магистральный трубопровод длиной $l = 800$ м. В т. *B* магистраль разделяется на две нитки: одна идет к пункту *C*, где расходуется $Q_C = 11$ л/с, другая – к пункту *D*, где потребляется $Q_D = 95$ л/с. Определить диаметры каждого участка и отметку уровня воды в баке, при условии, что $V \leq 1,2$ м/с.

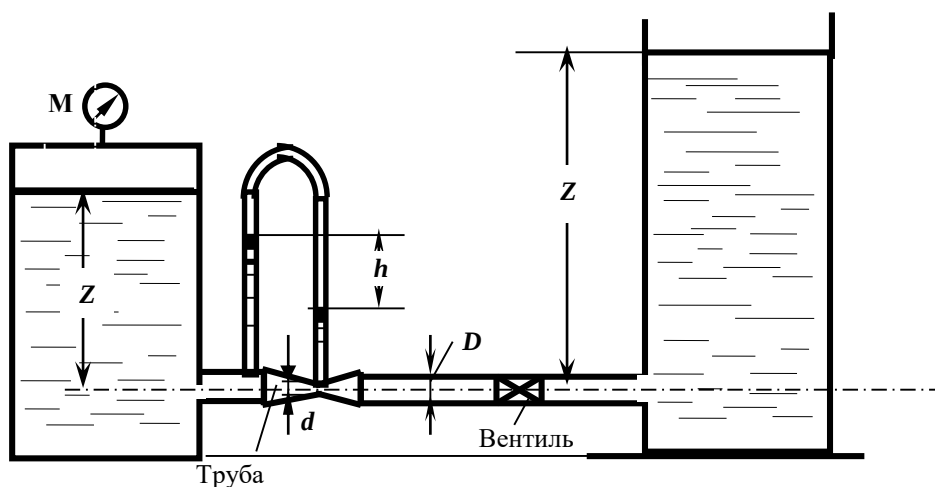


Контрольная работа № 19

1. От чего зависит величина коэффициента гидравлического трения в квадратичной области сопротивления турбулентного режима?
2. Рассчитать диаметр трубы для пропуска расхода $Q = 2$ л/с при скорости $V = 1,0$ м/с.
3. Каким прибором определяется полный напор в точке потока жидкости? Начертить схему прибора.
4. Какие внешние факторы вызывают потери напора по длине? Записать расчетные зависимости для определения этих потерь.
5. Определить режим движения жидкости в трубе диаметром $d = 50$ мм при расходе $Q = 1,2$ л/с, если коэффициент кинематической вязкости жидкости равен $\nu = 0,3 \times 10^{-4}$ м²/с.

Задача

В трубопроводе диаметром $D = 100$ мм длиной $l = 100$ м установлен расходомер Вентури с модулем $d^2/D^2 = 0,3$. Определить расход воды Q по перепаду уровней жидкости в дифманометре $h = 0,5$ м. Определить избыточное давление на поверхности жидкости в баке, под действием которого происходит движение при следующих данных: $Z_1 = 2$ м, $Z_2 = 5$ м, коэффициенты сопротивления вентиля принять $\zeta_{\text{вен}} = 7,0$; трубы Вентури $\zeta_{\text{Вент}} = 0,5$; остальные коэффициенты местных сопротивлений по таблице. Труба водопроводная нормальная (коэффициент Дарси при турбулентном режиме можно определить по таблице).

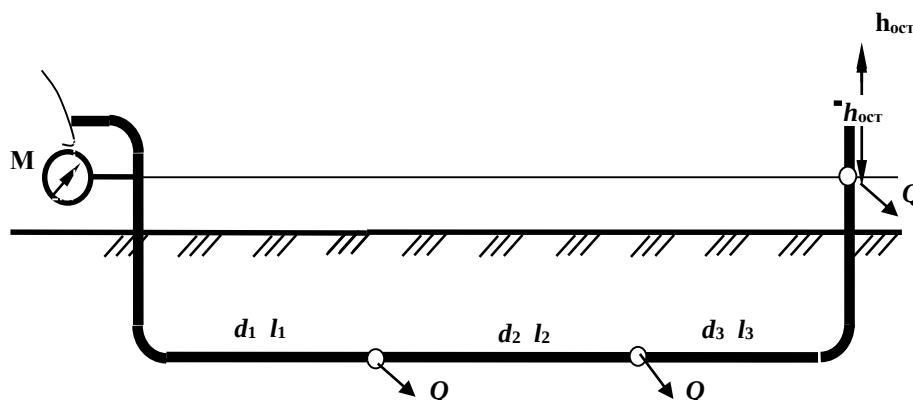


Контрольная работа № 20

1. Какой трубопровод называется простым?
2. Рассчитать гидравлический радиус потока жидкости в круглой трубе диаметром $d = 100$ мм и в трубе квадратного сечения со стороной $a = 200$ мм.
3. Представить уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости, начертить диаграмму уравнения. Дать пояснение всех параметров, входящих в уравнение.
4. Как изменятся потери напора по длине при постоянном расходе, если диаметр трубопровода уменьшится в 2 раза? Показать расчетом.
5. Определить, при каком значении коэффициента кинематической вязкости ν возможен ламинарный режим в трубе $d = 50$ мм при скорости движения $V = 1,2$ м/с.

Задача

Определить расходы воды у потребителей в системе трех последовательно соединенных труб: $d_1 = 200$ мм, $l_1 = 600$ м, $d_2 = 150$ мм, $l_2 = 300$ м, $d_3 = 100$ мм, $l_3 = 200$ м, если показания манометра в начале системы $p_m = 3,0$ ат и остаточный напор у потребителя должен быть не менее 10 м. Местные потери принять равными 5% от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию.

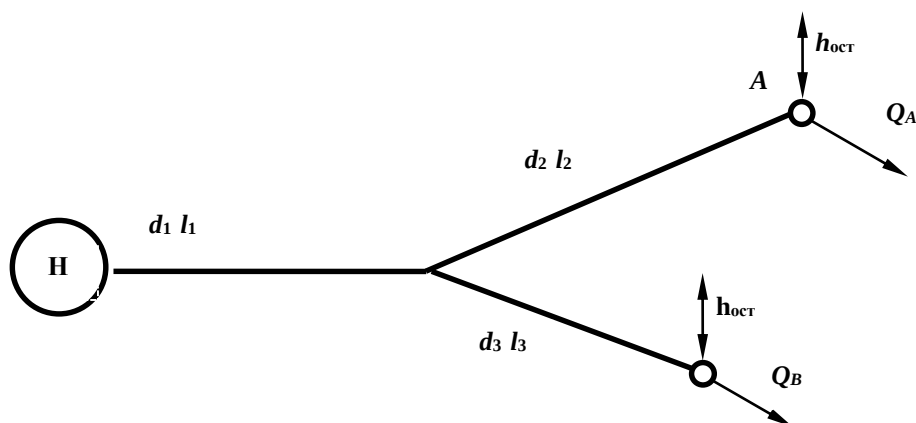


Контрольная работа № 21

1. Дать определение ламинарного режима.
2. Определить, при какой скорости воды в трубе диаметром $d = 100$ мм будет обеспечен расход $Q = 2,0$ л/с.
3. Записать уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости, построить диаграмму уравнения, пояснить параметры, входящие в уравнение.
4. Рассчитать потери напора по длине в трубе диаметром $d = 100$ мм длиной $L = 10$ м при расходе $Q = 8,2$ л/с и коэффициенте гидравлического трения $\lambda = 0,04$.
5. Определить режим движения воды в трубе диаметром $d = 100$ мм при скорости $V = 1,2$ м/с, если кинематический коэффициент вязкости $\nu = 10^{-6}$ м²/с, шероховатость внутренней поверхности трубы $\Delta = 0,5$ мм. При турбулентном режиме установить область сопротивления.

Задача

Рассчитать тупиковую водопроводную систему, снабжающую водой шахты A и B , а также определить высоту водонапорной башни H (действующий напор), если остаточный напор у потребителя должен быть не менее 10 м, расходы шахт составляют $Q_A = 40$ л/с; $Q_B = 60$ л/с, эксплуатационная скорость в трубах $V_{\text{эк}} = 1,5$ м/с; длины участков: $l_1 = 1000$ м, $l_2 = 1200$ м, $l_3 = 900$ м. Местные потери принять равными 10% от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию. Чертеж представлен в плане

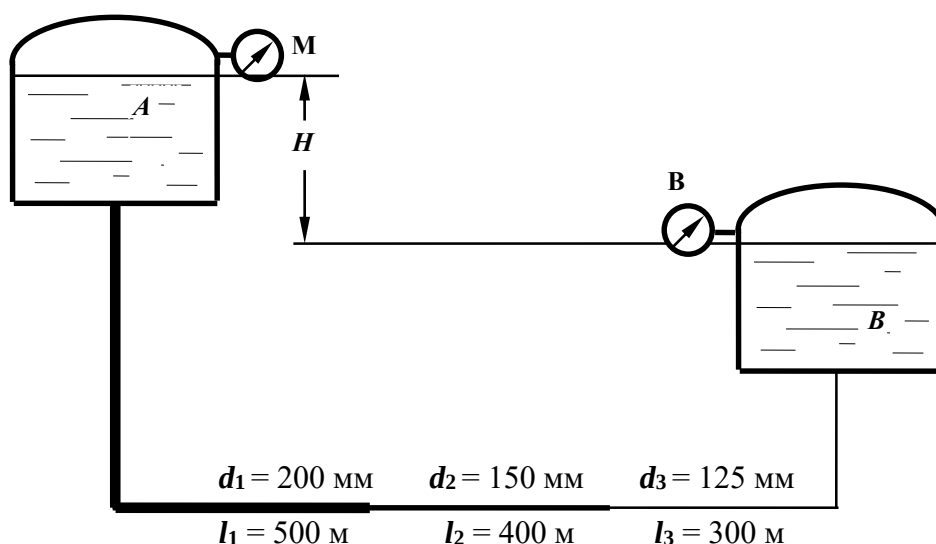


Контрольная работа № 22

1. Охарактеризовать турбулентный режим движения.
2. Определить пропускную способность (расход) для трубы диаметром $d = 100$ мм при скорости движения потока воды $V = 1,27$ м/с.
3. Записать уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости, построить диаграмму уравнения. Пояснить параметры, входящие в уравнение.
4. Рассчитать коэффициент гидравлического трения λ для водопроводной трубы $d = 100$ мм, длиной $L = 40$ м, если потери напора по длине $h_l = 1,5$ м при расходе $Q = 9,5$ л/с.
5. Определить режим движения воды в трубе диаметром $d = 50$ мм с шероховатостью $\Delta = 1,0$ мм при скорости $V = 1,2$ м/с, если кинематический коэффициент вязкости $\nu = 10^{-6}$ м²/с. Для турбулентного режима установить область сопротивления.

Задача

Расход $Q = 20$ л/с поступает из напорного бака A в резервуар B по системе последовательно соединенных труб (размеры – на схеме). Определить H при следующих показаниях приборов: $p_{ман} = 0,5$ ат, $p_{вак} = 0,2$ ат. Трубы водопроводные нормальные. Местные потери составляют 10% потерь по длине. Построить пьезометрическую линию.

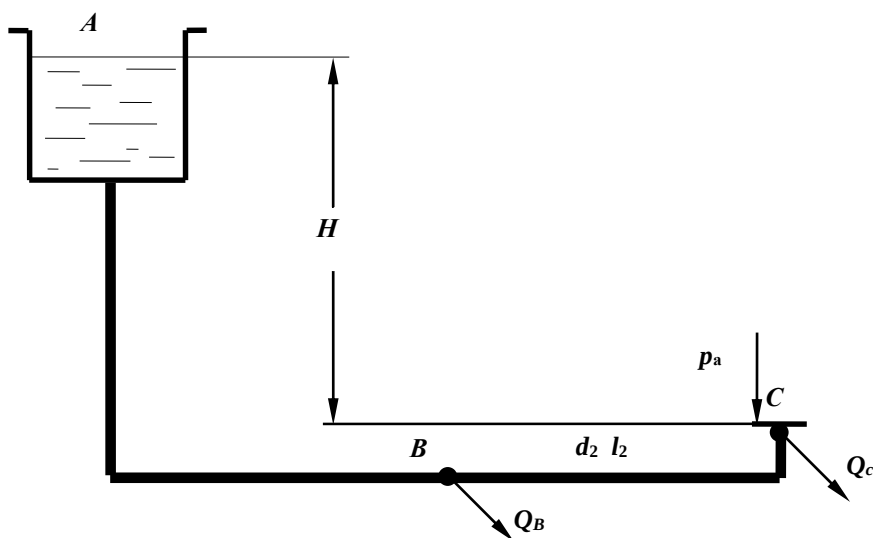


Контрольная работа № 23

1. Что такое критическая скорость и как ее определить для трубопровода?
2. Определить пропускную способность (расход) для трубы диаметром $d = 100$ мм, при скорости движения потока воды $V = 2,0$ м/с; какой режим движения в трубе при этой скорости?
3. Построить диаграмму уравнения Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости; пояснить геометрический смысл уравнения.
4. Как изменятся потери напора по длине, если расход жидкости увеличится в 2 раза, показать расчетом.
5. Определить, при какой скорости возможен ламинарный режим для потока жидкости в трубе диаметром $d = 50$ мм, если коэффициент кинематической вязкости жидкости равен $\nu = 0,3 \times 10^{-4}$ м²/с.

Задача

Из водонапорного бака A в пункты B и C подаются одинаковые расходы воды $Q_B = Q_C = Q$. Определить величину Q расхода у потребителей, если напор $H = 15$ м, трубы водопроводные, нормальные, соединены последовательно: $d_1 = 100$ мм, $l_1 = 500$ м, $d_2 = 75$ мм, $l_2 = 300$ м. Местные потери принять равными 5% от потерь по длине.

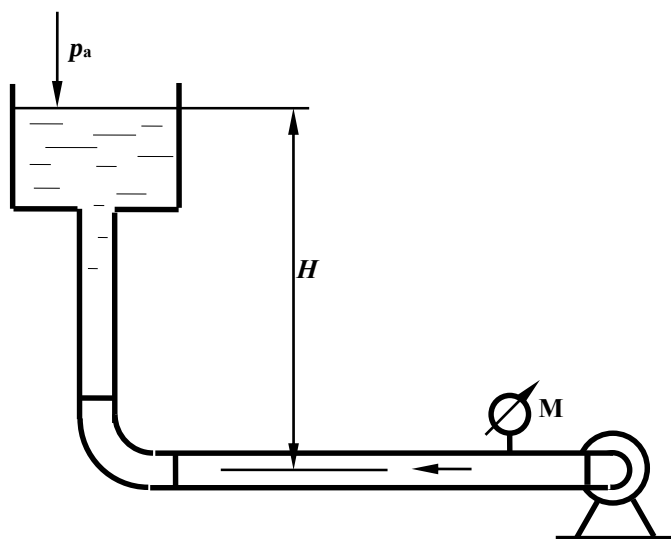


Контрольная работа № 24

1. Записать уравнение неразрывности потока.
2. Дать понятие гидростатического напора в сечении потока. Как он определяется экспериментально?
3. Рассчитать при каком значении коэффициента сопротивления пробкового крана $\zeta_{кр}$ будет обеспечен расход $Q = 1$ л/с в трубе диаметром $d = 50$ мм, если величина потерь напора в кране составляет $h_{кр} = 25$ см.
4. Определить потери напора по длине в трубе длиной $L = 20$ м диаметром $d = 50$ мм с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,5$ мм при расходе $Q = 2,5$ л/с, если коэффициент кинематической вязкости воды $\nu = 10^{-6}$ м²/с.
5. Рассчитать гидравлический радиус потока жидкости в круглой трубе диаметром $d = 200$ мм и в трубе квадратного сечения со стороной $a = 100$ мм.

Задача

Определить манометрическое давление, которое должен создавать насос, чтобы подать воду в количестве $Q = 5$ л/с в водонапорный бак на высоту $H = 12$ м по трубопроводу длиной $l = 50$ м с высотой выступов шероховатости внутренней поверхности трубы $\Delta_s = 1$ мм; при температуре воды $t = 15^\circ\text{C}$ ($\nu = 0,011463$ см²/с). Диаметр трубы $d = 150$ мм, коэффициент сопротивления колен $\zeta_{кол} = 0,29$.

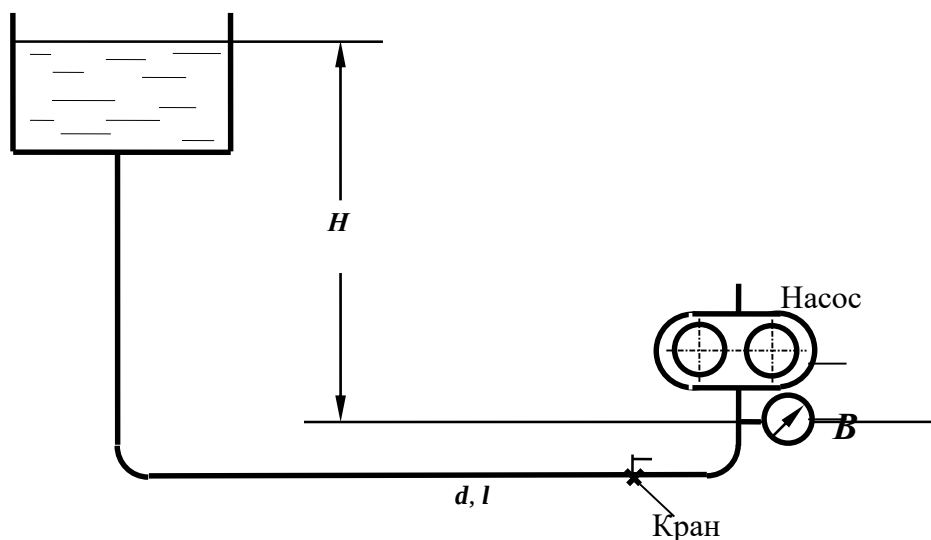


Контрольная работа № 25

1. Определение потерь напора по длине с помощью обобщенных параметров.
2. Рассчитать диаметр трубопровода для пропуска расхода $Q = 4$ л/с при скорости $V = 1,6$ м/с.
3. Записать уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости, построить диаграмму уравнения. Пояснить параметры, входящие в уравнение, исходя из геометрической интерпретации уравнения.
4. Определить потери напора в пробковом кране $h_{кр}$, если коэффициент сопротивления крана $\zeta_{кр} = 27,0$, а скорость движения воды $V = 2,1$ м/с.
5. Определить режим движения жидкости в трубе диаметром $d = 100$ мм с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,05$ мм при скорости $V = 0,21$ м/с, если коэффициент кинематической вязкости жидкости $\nu = 0,7 \times 10^{-6}$ м²/с.

Задача

Определить расстояние H от уровня жидкости в маслобаке, если давление на входе в шестеренный насос системы смазки, подающий расход $Q = 1$ л/с машинного масла $p_{\text{вак}} = 0,1$ ат; $\rho_m = 900$ кг/м³, $\nu = 38 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $d = 35$ мм, $l = 5$ м, $\zeta_{кр} = 4$, $\zeta_{\text{кол}} = 0,3$.

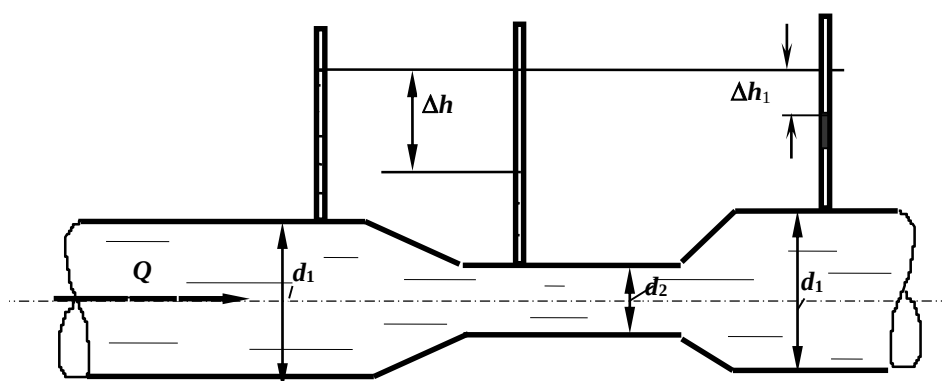


Контрольная работа № 26

1. Дать определение понятия «гидравлически гладкие стенки».
2. Определить разность показаний трубки Пито и пьезометра, если скорость в точке установки прибора равна $u = 0,21$ м/с. Начертить схему установки приборов.
3. Как преобразуется уравнение Бернулли при переходе от элементарной струйки идеальной жидкости к элементарной струйке реальной вязкой жидкости; привести формулы, пояснить параметры.
4. Определить разность показаний пьезометров, установленных до и после пробкового крана, если скорость движения воды в трубопроводе равна $V = 0,8$ м/с, а коэффициент сопротивления пробкового крана равен $\zeta_{кр} = 7,0$.
5. Определить, каким должно быть давление в начале трубы для транспортирования воды, если длина участка составляет $L = 150$ м, диаметр $d = 100$ мм с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,5$ мм, показание манометра в конце участка $p = 0,7$ ат, пропускная способность трубы равна $Q = 6,3$ л/с, кинематический коэффициент вязкости жидкости $\nu = 10^{-6}$ м²/с.

Задача

Определить разность показаний пьезометров Δh , установленных на водомере Вентури с диаметрами $d_1 = 100$ мм, $d_2 = 50$ мм, если расход воды равен $Q = 3$ л/с. Потерями напора в водомере пренебречь, коэффициент Кориолиса α принять равным 1. Найти также Δh_1 для случая учета сопротивления трубы Вентури, если принять $\zeta_{\text{Вентури}} = 0,5$.

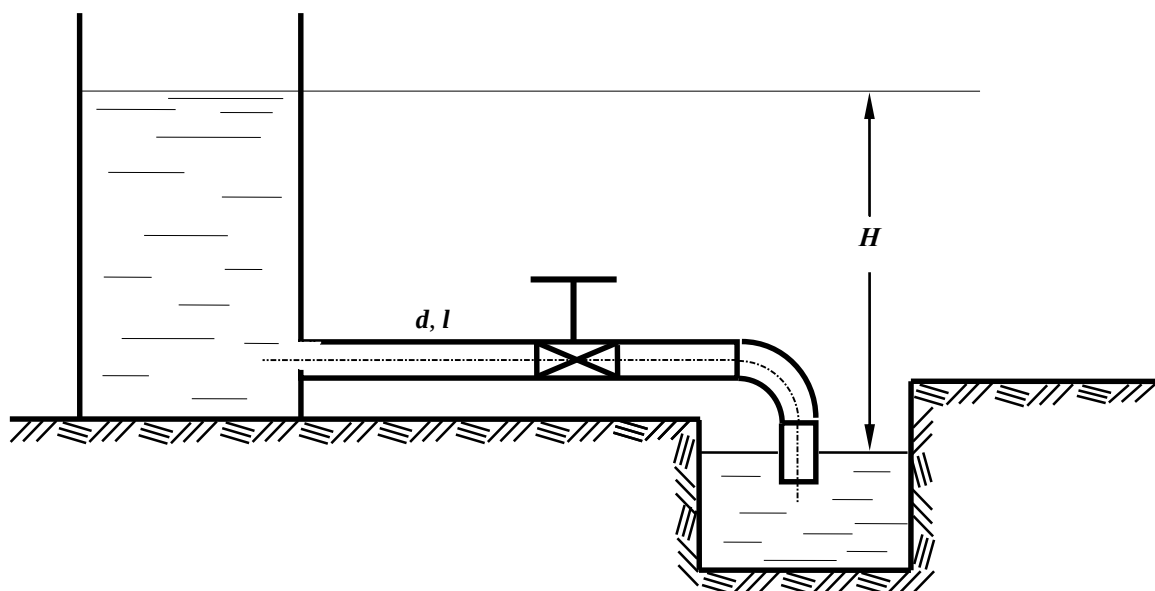


Контрольная работа № 27

1. Каким должен быть коэффициент сопротивления вентиля, чтобы при пропускной способности трубопровода $Q = 2,5$ л/с потери напора в вентиле составили $h_{\text{вент}} = 32$ см. Диаметр трубопровода равен $d = 50$ мм.
2. Определить скорость по оси потока жидкости в горизонтальной трубе, если показание трубки Пито, установленной по оси потока равно 100 мм, а показание пьезометра – 50 мм. Начертить схему установки приборов.
3. Записать уравнение Бернулли для потока реальной жидкости, начертить диаграмму уравнения.
4. Разность показаний пьезометров, установленных на расстоянии $L = 5$ м в горизонтальной водопроводной трубе диаметром $d = 50$ мм, равна 30 см. Определить коэффициент гидравлического трения (λ), если расход воды составляет $Q = 2,5$ л/с.
5. Что такое квадратичная область сопротивления?

Задача

Определить, какой должна быть разность уровней трансформаторного масла в резервуаре и отстойнике, чтобы по трубе диаметром $d = 50$ мм и длиной $l = 25$ м проходил расход $Q = 3,0$ л/с. На трубе установлен пробковый кран с углом открытия $\alpha = 20^\circ$. Кинематический коэффициент вязкости масла $\nu = 0,38 \cdot 10^{-4}$ м²/с.

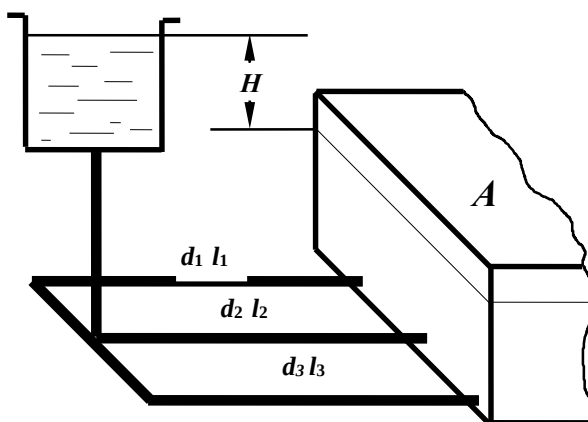


Контрольная работа № 28

1. Пояснить, какие параметры составляют гидравлическую характеристику сечения потока. Дать определения.
2. В горизонтальной трубе с плавным сужением скорость в первом сечении равна $V=0,5$ м/с, пьезометрический напор $-p_1/\rho g = 0,8$ м. Рассчитать пьезометрический напор во втором сечении, если диаметр трубы уменьшится в два раза.
3. Как преобразуется уравнение Бернулли при переходе от элементарной струйки идеальной жидкости к элементарной струйке реальной жидкости. Записать уравнения.
4. Рассчитать критическую скорость для потока бензина в трубе диаметром $d = 50$ мм, если кинематический коэффициент вязкости бензина равен $\nu = 0,7 \times 10^{-6}$ м²/с.
5. Определить давление в начале водопроводной стальной трубы длиной $L = 200$ м, диаметром $d = 100$ мм с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,5$ мм, если показание манометра в конце участка $p = 0,9$ ат, пропускная способность трубы равна $Q = 5,3$ л/с, кинематический коэффициент вязкости жидкости $\nu = 10^{-6}$ м²/с.

Задача

В бассейн A из напорного бака через три параллельно соединенных трубопровода поступает расход $Q = 50$ л/с. Определить необходимый напор H и расход в каждом трубопроводе, трубы водопроводные, нормальные; область сопротивления – квадратичная. Местные потери напора принять равными 10% от потерь по длине. Размеры труб: $d_1=150$ мм; $l_1=450$ м; $d_2=100$ мм; $l_2=400$ м; $d_3=200$ мм; $l_3=420$ м.

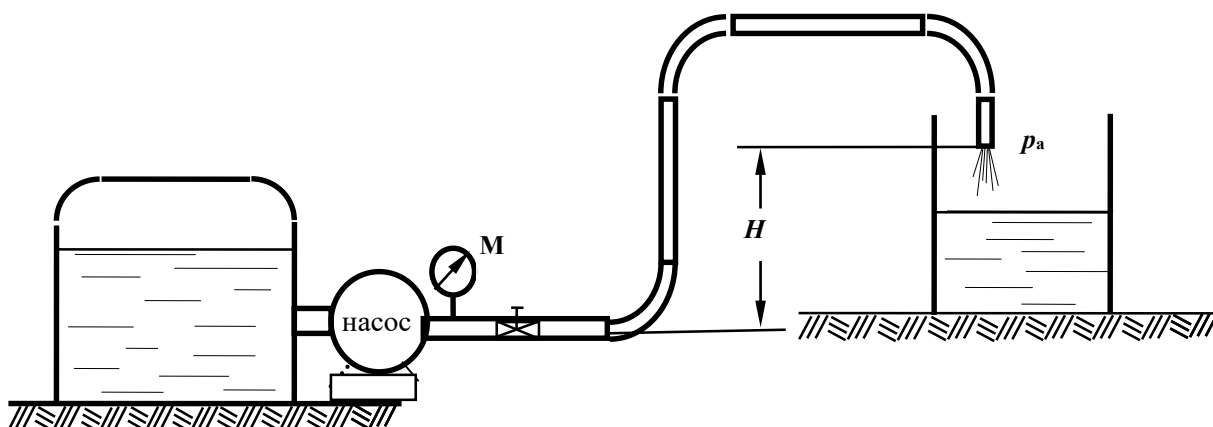


Контрольная работа № 29

1. Записать дифференциальные уравнения движения жидкости (уравнение Эйлера).
2. Рассчитать скоростной напор потока воды в трубе диаметром $d = 100$ мм, если при таком же расходе скоростной напор в трубе диаметром $d = 50$ мм равен $0,2$ м.
3. Записать уравнение Бернулли для элементарной струйки вязкой жидкости. Дать пояснения параметров, входящих в уравнение, учитывая его геометрическую интерпретацию. Построить диаграмму уравнения.
4. При какой скорости потока воды произойдет переход от ламинарного режима к турбулентному в стеклянной трубе диаметром $d = 30$ мм, если кинематический коэффициент вязкости равен $\nu = 10^{-6}$ м²/с.
5. Определить потери напора при подаче воды по трубопроводу диаметром $d = 50$ мм и длиной $l = 150$ м при скорости потока $V = 1,3$ м/с и температуре 10°C ($\nu = 0,0131$ см²/с). Трубы стальные, новые ($\Delta = 0,05$ мм).

Задача

Определить длину трубопровода диаметром $d = 100$ мм ($\Delta = 0,5$ мм), с помощью которого бензин ($\rho = 700$ кг/м³ и $\nu = 3,0 \cdot 10^{-6}$ м²/с) может быть поднят на высоту $H = 12$ м при пропускной способности $Q = 6$ л/с, если показания манометра, установленного после насоса, $p_m = 1,2$ ат. Истечение бензина происходит в атмосферу. Сумму коэффициентов местных сопротивлений принять равной $\sum \zeta = 6,0$.



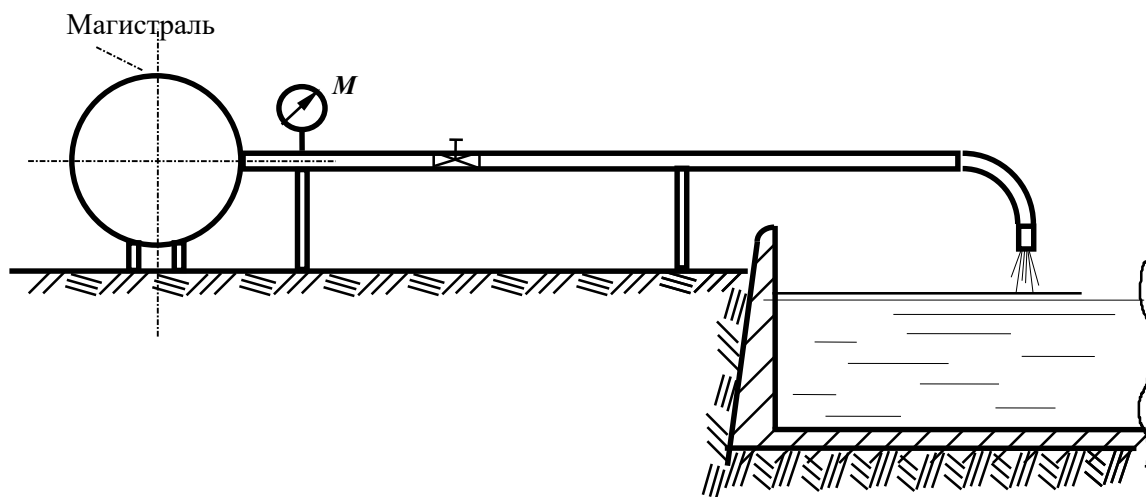
Контрольная работа № 30

1. Пояснить понятие *коэффициент расхода трубопровода*.
2. Определить сторону a квадратного сечения трубопровода пропускной способностью $Q = 2,5$ л/с при скорости движения жидкости $V = 1,0$ м/с.
3. Как преобразуется уравнение Бернулли при переходе от элементарной струйки реальной жидкости к целому потоку? Записать уравнения.
4. Определить при какой скорости движения воды в водопроводной трубе диаметром $d = 50$ мм и длиной $L = 40$ м потери напора по длине составят $h_l = 30$ см. Коэффициент гидравлического трения $\lambda = 0,03$.
5. Определить давление в конце водопроводной трубы длиной $L = 150$ м, диаметром $d = 100$ мм ($\Delta = 1,0$ мм), если показание манометра в начале трубы $p = 0,87$ ат, расход составляет $Q = 6,3$ л/с ($\nu = 10^{-6}$ м²/с).

Задача

Определить какой объем воды (W) наполнится в бассейне за 30 мин, если на трубе установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 30^\circ$ и одно колено.

Через нормальную водопроводную трубу длиной $l = 50$ м и диаметром $d = 100$ мм, присоединенную к магистральному трубопроводу с избыточным давлением $p_m = 100$ кПа,





**Министерство образования Российской
Федерации**

**Уральская государственная горно-
геологическая академия**

Т. П. Бебенина, С. И. Часс, Н. В. Савинова

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ГИДРОДИНАМИКЕ**

Екатеринбург

2004

Министерство образования Российской Федерации
Уральская государственная горно-геологическая академия

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
горномеханического факультета

" 3 " ноября 2003г.

Председатель комиссии, проф.

 Н.Б. Ситников

Т. П. Бебенина, С. И. Часс, Н. В. Савылова

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ГИДРОДИНАМИКЕ**

Лабораторный практикум по гидродинамике / Т.П. Бебенна, С.И. Часс, Н.В. Савинова; Уральская госуд. горно-геол. академия. Каф. технической механики. - Екатеринбург: Изд. УГГА, 2004. - 69с.

Методическое пособие составлено в соответствии с программами курса «Гидромеханика» и «Гидравлика».

Лабораторный практикум по гидродинамике содержит теоретические основы гидравлического экспериментирования, методы и технику выполнения лабораторных работ, материалы для обработки экспериментальных данных и оценки точности эксперимента. Практикум включает основные лабораторные работы по разделу «Гидродинамика» и предназначен в качестве учебного пособия для студентов всех специальностей, изучающих гидравлические дисциплины.

Методическая разработка рассмотрена на заседании кафедры технической механики 04.07.2003 года (протокол № 45) и рекомендована для издания.

Рецензент – Л.И. Пастухова, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики УГТУ (УПИ).

© Уральская государственная горно-геологическая академия, 2004

Содержание

1. <i>Лабораторная работа №1.</i> Экспериментальное изучение уравнения Д.Бернулли.	4
2. <i>Лабораторная работа №2.</i> Изучение режимов движения жидкости	20
3. <i>Лабораторная работа №3.</i> Определение потерь напора по длине и коэффициента гидравлического трения.	28
4. <i>Лабораторная работа №4.</i> Определение местных потерь напора и коэффициентов местных сопротивлений.	41
5. <i>Лабораторная работа №5.</i> Истечение жидкости через отверстие и насадки.	51
6. <i>Лабораторная работа №6.</i> Определение эквивалентной шероховатости.	63
Список использованной литературы.	69

Лабораторная работа № 1

Экспериментальное изучение уравнения Бернулли

Уравнение Бернулли – одно из основных уравнений прикладной гидродинамики. С его помощью решается широкий круг инженерных задач. Принцип действия многих приборов для измерения скорости и расхода потока жидкостей основан на использовании уравнения Бернулли.

В гидравлике уравнение Бернулли используется трёх видов:

- для элементарной струйки идеальной жидкости,
- для элементарной струйки вязкой жидкости,
- для потока реальной (вязкой) жидкости.

Вывод каждого последующего уравнения базируется на предыдущем. В то же время каждое уравнение имеет самостоятельное значение и свой круг задач, решаемых с его помощью.

1.1. Теоретические положения

Уравнение Бернулли – уравнение движения жидкости, устанавливающее связь между давлением, скоростью и положением сечения потока или, иначе, между удельной кинетической и удельной потенциальной энергией:

- для элементарной струйки идеальной жидкости

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (1.1)$$

- для элементарной струйки вязкой жидкости

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h'_{w1-2} \quad (1.2)$$

- для потока реальной (вязкой) жидкости

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2} \quad (1.3)$$

Индексы 1 и 2 соответствуют номерам сечений потока, расположенных по ходу движения жидкости.

В уравнениях приняты обозначения:

z – расстояние по вертикали от плоскости сравнения до центра живого сечения, м;

p – абсолютное давление в центре сечения, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

u – действительная скорость в сечении струйки или в точке сечения потока, м/с;

v – средняя скорость в сечении потока, м/с;

α – коэффициент Корiolиса;

h'_{w1-2} , h_{w1-2} – потери энергии (напора) при движении единицы веса жидкости между двумя сечениями струйки и потока.

1.1.1. Энергетическая интерпретация уравнения Бернулли

Все слагаемые уравнения Бернулли выражают энергетические характеристики жидкости, а именно *удельные* (т.е. соответствующие единице веса жидкости) энергии:

z – удельная потенциальная энергия положения;

$\frac{p}{\rho g}$ – удельная потенциальная энергия давления;

$\frac{u^2}{2g}$, $\frac{\alpha v^2}{2g}$ – удельная кинетическая энергия движущейся жидкости;

$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ – удельная механическая (полная) энергия.

Для *идеальной* жидкости удельная механическая энергия остается постоянной во всех сечениях одной и той же элементарной струйки, взятых по ее длине, т.е. уравнение Бернулли (1.1) выражает *закон сохранения энергии*.

Движение *вязкой* жидкости вызывает обязательное появление касательных напряжений в соответствии с законом вязкого трения. Работы касательных напряжений приводит к переходу части механической энергии в тепло, которое рассеивается по всему объему жидкости и теряется безвозвратно. Поэтому в уравнение Бернулли (1.2) вводится дополнительный член $h_{\text{в.т.}}$, учитывающий затраты энергии при движении между двумя сечениями струйки.

Поток жидкости конечных размеров теоретически представляется в виде совокупности бесчисленного множества элементарных струек. И, переходя от струйки к целому потоку жидкости, энергию струек, находящихся в сечении потока, складывают. При этом удельная потенциальная энергия для потока жидкости с *установившимся равномерным* движением выражается так же, как и для струйки, вследствие справедливости для данного вида движения гидростатического закона распределения давления: для всех точек одного и того же сечения $z + p/(\rho g) = \text{const}$.

При определении кинетической энергии в сечении потока необходимо учитывать закон распределения скорости по живому сечению, который весьма сложен и зависит от режима течения. Поэтому для практических расчетов при решении *одномерных* задач вводят понятие средней скорости, по которой и определяют удельную кинетическую энергию в сечении потока. *Средняя скорость* — это скорость, постоянная во всех точках сечения, при которой расход остается таким же, как при действительном распределении скоростей в точках сечения:

$$v = Q/\omega, \quad (1.4)$$

где Q — расход жидкости;
 ω — площадь живого сечения потока.

При определении кинетической энергии по средней скорости появляется ошибка, которую устраняют введением коэффициента α , называемым коэффициентом Кориолиса (коэффициентом корреляции кинетической энергии) и учитывающим неравномерность распределений действительной скорости. Тогда удельная кинетическая энергия для потока имеет вид: $\alpha v^2/2g$.

Уравнение Бернулли для *потока* вязкой жидкости — это уравнение *баланса удельной энергии* при движении жидкости между двумя сечениями, записанное на основе закона сохранения энергии, где затраты удельной механической энергии, вызванные вязким трением, учтены слагаемым $h_{\text{в.т.}}$.

1.1.2. Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли

Все слагаемые, входящие в уравнение Бернулли, имеют размерность длины и характеризуют следующие высоты (или напоры):

- z — *геометрическая высота (геометрический напор)* — высота положения центра сечения, которая отсчитывается по вертикали от выбранной горизонтальной *плоскости сравнения*;

- $\frac{p}{\rho g}$ — *пьезометрическая высота (пьезометрический напор)*,

определяется с помощью пьезометра, установленного в рассматриваемом сечении потока;

- $\frac{\alpha v^2}{2g} = H_{\text{ск}}$ — *скоростной напор* (или высота скоростного напора).

Сумма геометрического и пьезометрического напоров называется *гидростатическим напором*:

$$z + \frac{p}{\rho g} = H_{\text{ст}}. \quad (1.5)$$

Гидростатический и скоростной напоры в сумме составляют *полный напор*:

$$H = H_{ст} + H_{ск} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (1.6)$$

Геометрическая интерпретация слагаемых уравнения обусловлена их экспериментальным определением, которое поясняется рис. 1.1. Отсчитывая для сечения геометрический z и пьезометрический $p/(\rho g)$ напоры по одной шкале с нулем, расположенным на плоскости сравнения 0-0, по уровню воды в пьезометре сразу получаем величину *статического напора* $H_{ст}$.

Полный напор H в *точке* сечения, например, в его центре, может быть определен *трубкой Пито*. Это стеклянная трубка, один конец (носик) которой загнут под углом 90° и установлен навстречу потоку (см. рис. 1.1). По уравнению Бернулли можно получить, что труб-



Рис. 1.1. Экспериментальное определение статического, полного и скоростного напоров

ка Пито определяет величину полного напора H , а разность показаний трубки Пито и пьезометра соответствует величине скоростного напора в данной точке сечения

$$\frac{u^2}{2g} = H_{ск} \quad (1.7)$$

На этом основано определение действительной скорости u в *точке* потока, в которой располагается носик трубки Пито:

$$u = \sqrt{2gH_{ск}} \quad (1.8)$$

1.1.3. Диаграмма уравнения Бернулли, ее построение и анализ

При движении потока жидкости в трубе переменного сечения с изменением диаметра имеют место:

- перераспределения видов механической энергии (напоров);
- затраты энергии на преодоление гидравлических сопротивлений.

Это отражается с помощью диаграммы.

Графическое изображение напоров в сечениях, взятых по длине потока и связанных уравнением Бернулли, называют *диаграммой уравнения*.

Построение диаграммы для трех сечений трубопровода рассмотрено на рис. 1.2.

На трубопроводе намечены сечения 1-1, 2-2, 3-3 с различными диаметрами d_1 , d_2 , d_3 . В сечениях установлены пьезометры, по которым в каждом сечении определяется статический напор. На схеме трубопровода в принятом масштабе для каждого сечения от выбранной горизонтальной плоскости сравнения 0-0 откладывается величина статического напора $H_{ст}$, в которую входят геометрический z и пьезометрический $p/(\rho g)$ напоры.

Линия, соединяющая значения статических напоров в сечениях по длине потока, называется *пьезометрической линией*. Эта линия наглядно показывает изменения давления в сечениях, вызванные измене-

ниями их размеров. При переходе от большего сечения 1-1 к меньшему 2-2 давление падает, к большему 3-3 - вновь возрастает, т.е., пьезометрическая линия для трубопровода переменного сечения по ходу движения жидкости может как опускаться, так и подниматься. Затем в каждом сечении рассчитывается средняя скорость v и скоростной напор $\alpha v^2/(2g)$. По условию неразрывности потока скоростной напор в сечении 2-2 больше скоростного напора в сечении 1-1, т.е. часть потенциальной энергии жидкости преобразуется в кинетическую. Это подтверждено на диаграмме (см. рис. 1.2) падением пьезометрической линии. И, наоборот, при переходе к большему сечению 3-3 скоростной напор уменьшается, давление возрастает. Пьезометрическая линия поднимается.

Складывая статический напор $H_{ст}$ с рассчитанным скоростным напором $\alpha v^2/(2g)$, в каждом сечении определяют полный напор H .

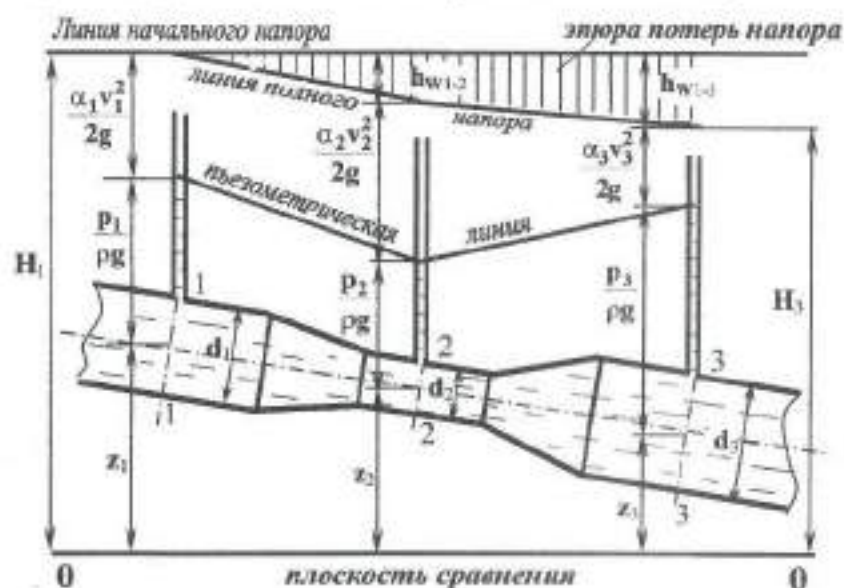


Рис.1.2. Диаграмма уравнения Бернулли для потока вязкой жидкости

Линия, соединяющая на диаграмме значения полных напоров в сечениях по длине потока, называется *линией полного напора* или *линией полной удельной энергии*. Полный напор в сечениях потока непрерывно уменьшается на величину *потерь напора* (напора, затраченного на преодоление гидравлических сопротивлений), поэтому *линия полного напора* обязательно *понижается* по ходу движения жидкости.

Проведя горизонтальную линию на уровне полного напора в *первом* сечении (линию начального напора), получают на диаграмме область, называемую *эпюрой потерь напора*, заштрихованную вертикальными штриховыми линиями. Их высота соответствует разностям полного напора в сечении 1-1 и в любом последующем сечении, и показывает потери напора в гидравлических сопротивлениях от начала движения до рассматриваемого сечения.

1.2. Выполнение лабораторной работы

1.2.1. Цель лабораторной работы

Основная цель - научиться определять параметры, входящие в уравнение Бернулли:

- на напорном трубопроводе переменного сечения проследить по приборам переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно (при изменении размера сечений) в соответствии с уравнением Бернулли;
- по опытным данным построить диаграмму уравнения Бернулли, а именно, пьезометрическую линию, линию полного напора и эпюру потерь напора;
- проанализировать построенную диаграмму;
- для указанных сечений определить скоростной напор с помощью трубки Пито и пьезометра, рассчитать максимальную скорость в сечении и сравнить ее со средней скоростью потока в данном сечении.

1.2.2. Описание лабораторной установки

Опытная установка (рис. 1.3, б) состоит из напорного бака, наклонно расположенной трубы переменного сечения и мерной емкости. В напорный бак для поддержания постоянного напора во время проведения опыта может подаваться вода с помощью подпиточной трубы из системы водоснабжения или с помощью насоса из зумпфа. Труба переменного сечения снабжена регулирующим вентилем и пробковым краном для обеспечения установившегося движения при проведении опыта.

Рабочий участок трубы расположен на стенде и выполнен из оргстекла. На стенде обозначена *плоскость сравнения*, принятая за «0» шкалы, и выполнена градуировка по вертикали (цена деления – 1 см).

По длине рабочего участка трубы для выполнения лабораторной работы выбраны 19 характерных сечений, отражающих все изменения ее конфигурации и отвечающих целям работы. В каждом таком сечении выведены штуцеры для присоединения к пьезометрическим трубкам и для установки трубок Пито (в сечениях 1, 2, 4, 7, 11, 15, 19).

На участке трубы от 13 до 19 сечения имеются штуцеры для отбора жидкости по пути следования. Это – *путевой расход* $Q_{\text{пут}}$. Для определения его величины предназначена мерная емкость – бак, который имеет градуировку с ценой деления 5000 см^3 . На трубе за рабочим участком установлен расходомер – механический счетчик количества протекающей жидкости. Он предназначен для измерения объема транзитного расхода $Q_{\text{тр}}$, т.е., расхода, который присутствует в трубе от начала до конца.

Кроме упомянутых приборов в работе используются секундомеры для определения времени заполнения фиксированного объема воды в мерном баке и при работе с расходомером.

Экспериментальные данные во время выполнения работы заносятся в бланк с таблицей и со схемой установки (см. рис. 1.3). Бланк по ходу обработки эксперимента заполняется расчетными данными и затем на нем с использованием схемы трубопровода строится диаграмма уравнения Бернулли.

1.2.3. Порядок выполнения работы

1. На установке с помощью подпиточной трубы, регулирующего вентиля и пробкового крана обеспечивается установившееся движение жидкости (вместо подпиточной трубы может быть использован насос).

2. Затем в *каждом* сечении снимаются *показания пьезометров* и заносятся в первую строку бланка отчета.

3. В сечениях, где установлены трубки Пито, определяется *разность показаний трубки Пито и пьезометра*, что соответствует величине скоростного напора в точке установки трубки Пито, т.е. по оси потока. Данные заносятся в 7-ю строку бланка.

4. На установке работает бригада из нескольких человек. *Одновременно* со снятием показаний пьезометров проводится определение *времени заполнения указанного объема воды* в мерном баке и *времени прохождения установленного объема* по водомеру.

1.2.4. Обработка результатов эксперимента

1. Расход определяется объемным методом:

$$Q_{\text{пут}} = W_{\text{пут}} / t_{\text{пут}}; \quad Q_{\text{тр}} = W_{\text{тр}} / t_{\text{тр}} \quad (1.9)$$

$$Q = Q_{\text{пут}} + Q_{\text{тр}} \quad (1.10)$$

где $W_{\text{пут}}$; $W_{\text{тр}}$ – объем путевого расхода и объем транзитного расхода, см^3 ;

$t_{\text{пут}}$; $t_{\text{тр}}$ – соответствующее время, с.

По приведенным формулам определяется величина расхода в сечениях с 1 по 13.

Определение расхода в последующих сечениях зависит от количества штуцеров, открытых во время опыта. Рассмотрим несколько примеров.

а) ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Объем транзитного расхода $W_{\text{тр}} = \text{см}^3$; время прохождения транзитного расхода $t_{\text{тр}} = \text{с}$; транзитный расход $Q_{\text{тр}} = \text{см}^3/\text{с}$
 Объем путевого расхода $W_{\text{пут}} = \text{см}^3$; время заполнения объема путевого расхода $t_{\text{пут}} = \text{с}$; путевой расход $Q_{\text{пут}} = \text{см}^3/\text{с}$
 Общий расход воды $Q = Q_{\text{тр}} + Q_{\text{пут}} = \text{см}^3/\text{с}$; $Q_{10} = \text{см}^3/\text{с}$; $Q_{13} = \text{см}^3/\text{с}$; $Q_{17} = \text{см}^3/\text{с}$

№№ пп	Наименование параметров	Номера сечений																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1.	Статистический напор (удельная потенциальная энергия) $z + p/\rho g$, см																			
2.	Площадь живого сечения ω , см ²																			
3.	Средняя скорость в сечении v , рассчитанная через расход $v = Q/\omega$, см/с																			
4.	Скоростной напор в сечении (удельная кинетическая энергия) $\alpha v^2/2g$, см; при $\alpha=1,1$																			
5.	Полный напор в сечении (полная удельная энергия) $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$, см																			
6.	Потери напора $h_{\text{вс}}$, см (рассчитываются относительно сечения 1)																			
7.	Скоростной напор по оси потока $v^2/2g$, см																			
8.	Скорость по оси потока u , см/с																			

б)

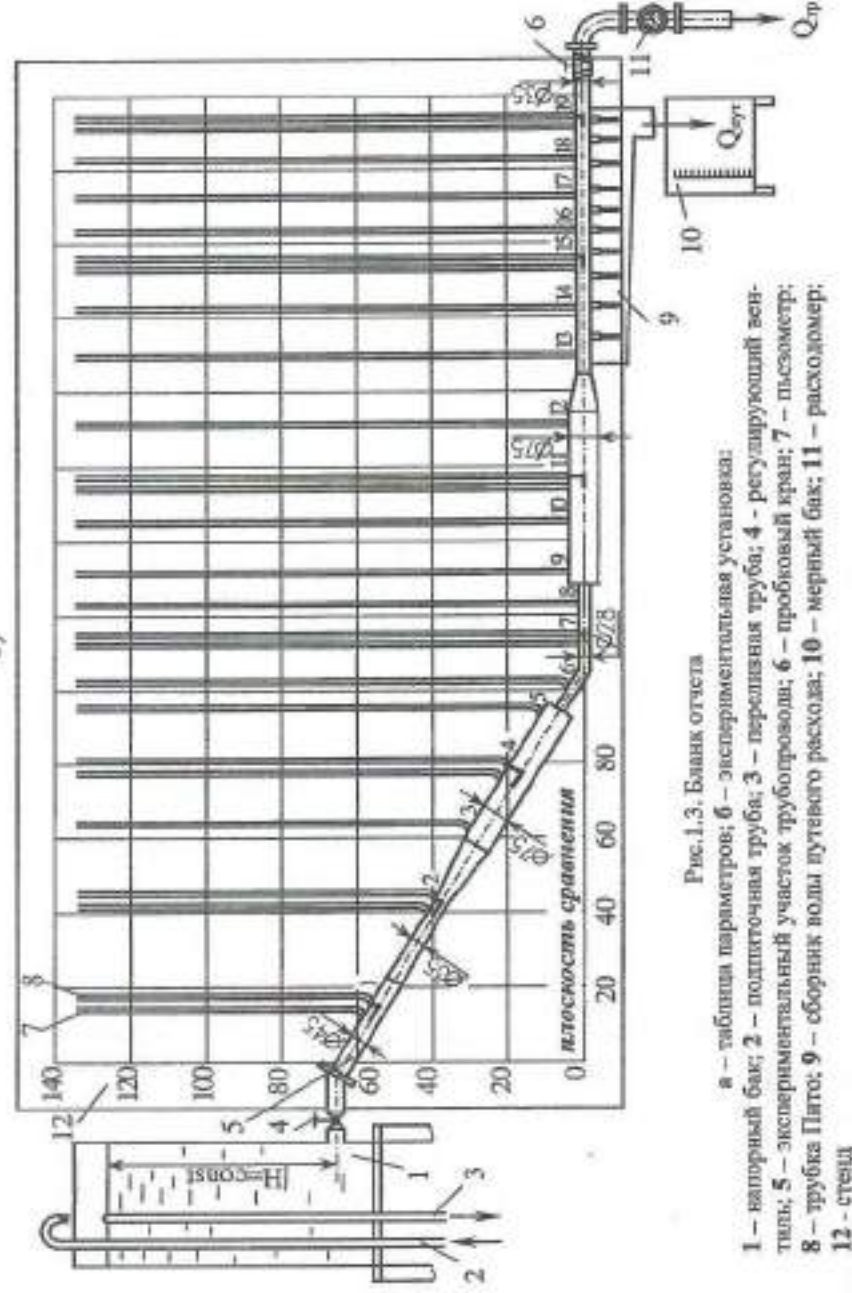


Рис.1.3. Бланк отчета

а - таблица параметров; б - экспериментальная установка;

1 - напорный бак; 2 - подпиточная труба; 3 - переливная труба; 4 - регулирующий вентиль; 5 - экспериментальный участок трубопровода; 6 - пробковый кран; 7 - пьезометр; 8 - трубка Пито; 9 - сборник воды путевого расхода; 10 - мерный бак; 11 - расходомер; 12 - стени

Открыто 3 последних отверстия.

Расход Q для сечений с 1-го по 17-ое определяется по формуле (1.10), для 18-го сечения - $Q_{18} = Q - Q_{\text{пут}}/3$; для 19-го - $Q_{19} = Q_{\text{тр}}$.

Открыто 4 последних отверстия.

Расход Q для сечений с 1-го по 17-ое определяется по формуле (1.10), для 18-го сечения - $Q_{18} = Q - 2Q_{\text{пут}}/4$; для 19-го - $Q_{19} = Q_{\text{тр}}$.

Открыто 5 последних отверстий.

Расход Q для сечений с 1-го по 16-ое определяется по формуле (1.10), для 17-го сечения - $Q_{17} = Q - Q_{\text{пут}}/5$; для 18-го - $Q_{18} = Q - 3Q_{\text{пут}}/5$; для 19-го - $Q_{19} = Q_{\text{тр}}$.

При увеличении количества открытых отверстий определение расхода выполняется аналогично. Если работа выполняется без путевого расхода, то $Q = Q_{\text{тр}}$.

2. Определяются площади живых сечений:

$$\omega = \pi d^2 / 4 \quad (1.11)$$

3. Определяется средняя скорость во всех сечениях:

$$v = Q / \omega$$

4. Определяется скоростной напор по средней скорости:

$$H_{\text{ск}} = \alpha v^2 / (2g)$$

(при расчете принять: коэффициент Кориолиса $\alpha = 1,1$; ускорение свободного падения $g = 981 \text{ см/с}^2$).

5. Определяется полный напор во всех сечениях:

$$H = H_{\text{ст}} + H_{\text{ск}} = z + p/(pg) + \alpha v^2 / (2g)$$

6. Определяются потери напора в гидравлических сопротивлениях от начала движения жидкости, за которое принимается сечение 1, до каждого последующего сечения

$$h_{\text{в1-i}} = H_1 - H_i \quad (1.12)$$

где i - номер сечения, $i = 1, 2, 3, \dots, 19$.

7. По полученному с помощью трубок Пито и пьезометра скоростному напору, определяется максимальная скорость в сечении:

$$u_{\text{max}} = \sqrt{2gH_{\text{ск}}}.$$

8. Строится диаграмма уравнения. Для этого на схеме установки в масштабе откладываются в каждом сечении значения статического напора $H_{\text{ст}} = z + p/(pg)$, которые соединяются отрезками ломаной линии. Это - *пьезометрическая линия*. Затем выше, также для каждого сечения, откладываются значения полного напора $H = z + p/(pg) + \alpha v^2 / (2g)$ и тоже соединяются прямыми отрезками. Это - *линия полного напора*. После построения линии полного напора нужно построить эпюру потерь напора. Для этого через точку, соответствующую полному напору в сечении 1, проводят горизонтальную линию. Это - *линия начального напора*. Участок между линиями начального напора и полного напора заштриховывается вертикальной штриховкой. Это - *эпюра потерь напора*. Каждая штриховая линия соответствует потерям напора между первым и любым последующим сечением.

9. Оценить точность определения полного напора для одного из сечений, указанного преподавателем:

$$\delta H = \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta(z + \frac{p}{pg})}{(z + \frac{p}{pg})} + \left| \frac{2\Delta W}{W} \right| + \left| \frac{2\Delta t}{t} \right| \quad (1.13)$$

где $\Delta(z + \frac{p}{pg})$ - абсолютная ошибка показания пьезометра, равная

0,5 цены деления прибора; ΔW - абсолютная ошибка определения объема, равная 0,2 цены деления шкалы мерного бака; Δt - абсолютная ошибка определения времени, принимается равной 0,5 цены деления секундомера.

1.2.5. Вопросы для самопроверки и составления выводов по работе

1. Какой закон выражает уравнение Бернулли?
2. Какой напор называется статическим? Как экспериментально определяется в работе статический напор в сечениях по длине трубы?
3. Какая линия называется пьезометрической?
4. Проанализируйте изменения пьезометрической линии: на каких участках происходит ее понижение или повышение, чем оно обусловлено; наблюдаются ли скачки пьезометрической линии, на каких участках и чем вызваны?
5. Как изменяется пьезометрическая линия на участке постоянного сечения с путевым расходом?
6. Каков геометрический смысл каждого слагаемого в уравнении Бернулли?
7. Каков энергетический смысл каждого члена уравнения Бернулли и всего уравнения в целом?
8. Какая скорость входит в уравнение Бернулли для потока реальной жидкости, как она определяется?
9. Как определяется расход в лабораторной работе?
10. Как определяется полный напор в сечении?
11. Какие линии, кроме пьезометрической, строятся на диаграмме уравнения Бернулли?
12. Проанализируйте характер линии полного напора по длине трубы: имеется ли подъем линии? резкие падения, чем вызваны?
13. Как определяются потери напора в сечениях, как строится эпюра потерь напора?
14. Каким прибором можно определить скорость в данной точке сечения потока?
15. Сопоставьте значения средней скорости в сечении со скоростью по оси потока в том же сечении? Какая из них больше и почему?
16. Что такое геометрический, пьезометрический и гидравлический уклон? Какой уклон может быть только положительным?

Состав отчета

Отчет составляется на стандартных листах формата А4 и содержит:

- краткие теоретические положения, обязательно включающие используемые расчетные формулы с расшифровкой обозначений и их единицами измерения;
- бланк с заполненной таблицей и построенной диаграммой, на которой должны быть подписаны основные линии и для одного из сечений показаны все напоры;
- выводы по работе, в которых даются подробные ответы на следующие вопросы: 4, 5, 12, 15.

Лабораторная работа № 2

Изучение режимов движения жидкости

2.1. Теоретические положения

Современные представления о двух режимах движения жидкости сформировались в результате работ английского физика Осборна Рейнольдса, опубликованных в 1883-1885 годах и обобщивших экспериментальные исследования многих ученых. Было замечено, что затраты энергии на преодоление гидравлических сопротивлений при движении потока существенно зависят от характера движения жидкости. Было доказано наличие двух режимов движения – ламинарного и турбулентного.

Ламинарный называется упорядоченное течение жидкости, при котором жидкость в потоке перемещается как бы слоями, струйками, параллельными направлению течения, не перемешивающимися друг с другом. Ламинарный режим наблюдается при движении жидкостей с малыми скоростями или при движении очень вязких жидкостей.

Турбулентный режим – форма течения жидкости, при которой частицы совершают неустановившееся движение по сложным траекториям, слойность движения жидкости нарушается, появляется пульсация скорости, вызывающая более или менее интенсивное перемешивание жидких частиц в потоке.

Переход от ламинарного течения к турбулентному может начинаться со случайных возмущений параметров потока. Но пока скорости малы, возмущения затухают за счет действия сил вязкого трения. С увеличением скорости и ростом сил инерции возмущения приводят к потере устойчивости ламинарного режима и переходу его в турбулентный.

Гидродинамическая характеристика, определяющая режим движения жидкости, называется **числом Рейнольдса** Re . Расчетная зависимость числа Рейнольдса:

- для потоков любого профиля

$$Re = \frac{v l}{\nu} \quad (2.1)$$

- для трубопроводов круглого сечения:

$$Re = \frac{v d}{\nu} \quad (2.2)$$

где v – средняя скорость потока, м/с;
 l – линейная характеристика потока, м;
 d – диаметр трубы, м;
 ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с.

Скорость течения жидкости, при которой происходит переход от одного режима движения к другому, называется **критической** ($v_{кр}$). Число Рейнольдса, соответствующее критической скорости, так же называют критическим:

$$Re_{кр} = v_{кр} d / \nu.$$

В технических расчётах для течения в круглых трубах принято значение критического числа Рейнольдса $Re_{кр} = 2300$.

Ламинарный режим движения будет устойчивым для круглых труб при числах Рейнольдса $Re < 2300$.

При $Re > Re_{кр}$ режим движения будет турбулентным.

Практически переход от ламинарного движения к турбулентному происходит в некотором диапазоне чисел Рейнольдса от нижнего критического $Re_{кр}'' = 2300$ до верхнего критического $Re_{кр}' = 4000$. Область неустойчивого движения при расчетах относят к турбулентному течению, хотя визуально режим кажется близким к ламинарному.

2.2. Выполнение лабораторной работы

2.2.1. Цель работы

Изучить опытным путём с помощью подкрашивания струек воды наличие двух режимов движения. Рассчитать значения чисел Рейнольдса во всех опытах.

Сравнить визуальные наблюдения режимов движения с теоретическими расчётами.

2.2.2. Описание лабораторной установки

Установка Рейнольдса является классической для изучения режимов движения вязкой жидкости. На рис. 2.1. представлена схема установки, аналогичная установке Рейнольдса. Установка состоит из напорного бака 1 с постоянным уровнем жидкости. Из бака выведена стеклянная труба 2, имеющая плавный скругленный вход для обеспечения минимальных потерь напора при формировании потока в трубе. Диаметр трубы - $d = 30$ мм, длина - $l = 2,5$ м. Регулирующий кран 3 служит для изменения скорости движения воды по трубе. Промежуточный резервуар 4 предназначен для смягчения гидравлического удара при открытии и закрытии крана. Объём воды в опыте измеряется мерным бачком 5. Температура жидкости в питающем резервуаре регистрируется термометром 6.

Для визуального наблюдения за распределением струек жидкости в потоке к трубе подводится красящая жидкость по двум капиллярным трубкам из сосуда 7 с красителем. Поступление краски регулируется зажимом 8.

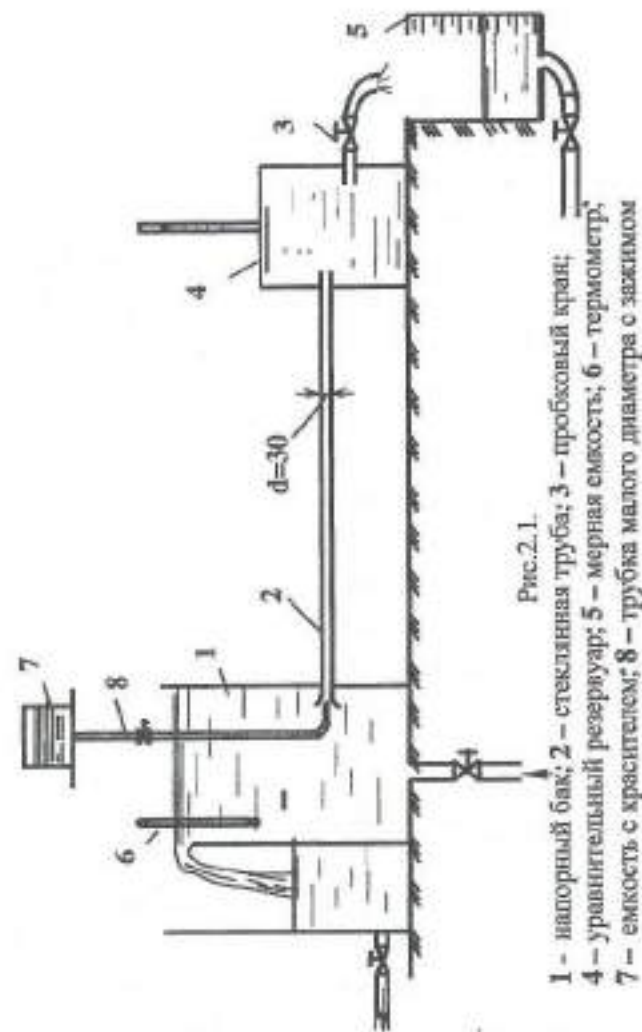


Рис. 2.1.

1 - напорный бак; 2 - стеклянная труба; 3 - пробковый кран;
4 - уравнительный резервуар; 5 - мерная емкость; 6 - термометр;
7 - емкость с красителем; 8 - трубка малого диаметра с зажимом

2.2.3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с установкой и с назначением каждого её элемента и устройства.

2. Записать показания термометра в табл. 2.1.

3. Опыт начинается с малых скоростей. Пробковому крану дается небольшое открытие. Одновременно ослабляется зажим у сосуда с красителем. Добиваются, чтобы скорость поступления красителя по двум капиллярным трубочкам была равна скорости движения воды в стеклянной трубе. Визуально наблюдают поведение окрашенных струек в потоке. При малых скоростях наблюдается параллельно-струйное, прямолинейное, послойное движение воды. В процессе опыта по секундомеру определяется время наполнения 1 литра воды в мерной ёмкости.

4. Пробковому крану дается большее открытие, опыт повторяется. Снова визуально наблюдается поведение окрашенных струек и фиксируется время наполнения принятого объёма воды в мерной ёмкости. Картина опыта снова зарисовывается, если она изменилась.

5. При постепенном открытии крана желателен уловить визуально момент перехода от ламинарного режима к турбулентному, т.е. режиму неустойчивого движения. Окрашенные струйки начинают колебаться, двигаться волнообразно. Скорость движения в этом опыте следует зафиксировать как критическую.

6. В последующих опытах крану дается наибольшее открытие, при котором наблюдаются сильные пульсации, завихрение струек, и наступает момент, когда краска полностью размывается. Это свидетельствует о турбулентном режиме движения. Картину опыта нужно зарисовать.

7. В последнем опыте следует пронаблюдать переход от турбулентного режима к ламинарному, для чего постепенно прикрывать кран.

8. Все опытные данные занести в табл. 2.1, сделать необходимые расчёты и зарисовки траекторий струек в каждом опыте. Для каждого опыта подсчитать значение числа Рейнольдса и сделать заключение о режиме движения.

Таблица 2.1.

Определение режимов движения воды

Наименование параметров	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
1. Диаметр трубы d , см					
2. Площадь сечения ω , см ²					
3. Температура воды T , °C					
4. Кинематический коэффициент вязкости воды ν , см ² /с					
5. Объём воды в мерном бак W , см ³					
6. Время заполнения объёма t , с					
7. Расход воды Q , см ³ /с					
8. Средняя скорость воды v , см/с					
9. Число Рейнольдса Re					
10. Режим движения (визуально)					
11. Режим движения (теоретически)					

2.2.4. Обработка результатов лабораторной работы

Для каждого опыта вычислить

1. площадь живого сечения $\omega = \pi d^2 / 4$,
2. величину расхода воды $Q = W / t$,
3. среднюю скорость воды $v = Q / \omega$,
4. число Рейнольдса $Re = vd / \nu$.

Кинематический коэффициент вязкости ν определяется по таблице 2.2 в соответствии с температурой воды.

5. по рассчитанным числам Re теоретически определяется режим движения при сравнении его с $Re_{кр} = 2300$.

Все расчетные данные заносятся в таблицу 2.1.

Таблица 2.2.

Кинематический коэффициент вязкости воды ν
при различной температуре T

$T, ^\circ\text{C}$	$\nu, \text{cm}^2/\text{с}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\nu, \text{cm}^2/\text{с}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\nu, \text{cm}^2/\text{с}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\nu, \text{cm}^2/\text{с}$
1	0,0173	8	0,0139	15	0,0115	22	0,0099
2	0,0168	9	0,0135	16	0,0112	23	0,0096
3	0,0162	10	0,0131	17	0,0109	24	0,0092
4	0,0157	11	0,0128	18	0,0106	25	0,0090
5	0,0152	12	0,0125	19	0,0104	26	0,0088
6	0,0148	13	0,0121	20	0,0101	27	0,0086
7	0,0144	14	0,0118	21	0,0100	28	0,0084

По заданию преподавателя для одного из опытов оценивается величина инструментальной погрешности при определении экспериментальных параметров:

- средней скорости v

$$\delta v = v \left(\frac{\delta W}{W} + \frac{\delta t}{t} + 2 \frac{\delta d}{d} \right),$$

- числа Re

$$\delta Re = Re \left(\frac{\delta v}{v} + \frac{\delta d}{d} + \frac{\delta \nu}{\nu} \right)$$

при $\delta W/W = 1,5\%$; $\delta t = 0,1 \text{ с}$; $\delta d = 0,5 \text{ мм}$; $\delta \nu/\nu = 1\%$.

2.2.5. Вопросы для самопроверки и составления выводов по работе

1. Из каких элементов состоит установка Рейнольдса? Их назначение?
2. Для чего измеряется температура воды?
3. Дать определение ламинарного режима, турбулентного течения.

4. Каково назначение сосуда с красителем? Как краситель подается в поток?

5. Каков порядок проведения опытов?

6. Какая скорость называется критической? Какой критерий является гидродинамической характеристикой потока?

7. Что такое критическое число Рейнольдса?

8. Как определяется расход? средняя скорость? число Рейнольдса?

9. Для чего в работе используется кинематический коэффициент вязкости? Какова его размерность?

10. Какими методами в работе определяется режим движения?

11. Чему равна теоретическая критическая скорость для данной трубы? Какое получено опытное значение критической скорости?

12. Совпали ли визуальные наблюдения с теоретическими расчетами?

Состав отчета

Отчет составляется на стандартных листах формата А4 и включает в себя:

- краткие теоретические положения, где обязательно приводятся используемые расчетные формулы с расшифровкой обозначений и их единицами измерения;
- схему установки с названиями входящих в нее элементов;
- выводы по работе, в которых даются ответы на следующие вопросы: 7, 10, 11, 12.

Лабораторная работа № 3

Определение потерь напора по длине и коэффициента гидравлического трения

3.1. Теоретические положения

Часть механической энергии, идущая на преодоление *сил гидравлического сопротивления*, возникающих при движении реальной (вязкой) жидкости по трубам и каналам, теряется для данной системы безвозвратно. Эта потеря обусловлена необратимым переходом механической энергии, равной работе сил вязкого трения, в теплоту. Поэтому под *гидравлическими сопротивлениями* будем понимать все внешние факторы, приводящие к затратам энергии, а под *гидравлическими потерями* - величину, равную потере полной энергии на данном участке.

Гидравлические сопротивления, а также и потери напора подразделяют на два вида

- *потери напора по длине (или линейные)*, т. е. распределенные по всей длине, вдоль которой происходит движение;
- *местные потери напора*, т. е. сосредоточенные в конкретном месте, где происходит переформирование потока.

Основным гидравлическим сопротивлением при движении потока жидкости является вся внутренняя поверхность твердой границы потока, так называемое *линейное сопротивление*.

Потери напора по длине в напорном трубопроводе зависят от геометрических размеров трубопровода, длины и диаметров трубы, средней скорости движения, режима движения жидкости и состояния внутренней поверхности трубы, т. е. её шероховатости.

Потери по длине рассчитываются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (3.1)$$

λ — коэффициент гидравлического трения, коэффициент Дарси;

l, d — длина и диаметр участка;

v — средняя скорость в сечении потока.

Значение коэффициента λ и выбор зависимости для его расчета в общем случае зависят от режима течения жидкости, характеризуемого числом Рейнольдса, и шероховатостью Δ/d . Характеристикой шероховатости внутренней поверхности труб является высота выступов шероховатости Δ — *абсолютная шероховатость*. Отношение Δ/d называют *относительной шероховатостью*, а обратную величину d/Δ — *относительной гладкостью*.

$$\lambda = f(Re, \frac{\Delta}{d}). \quad (3.2)$$

Потери напора h_l связаны со скоростью движения жидкости v закономерностью, которую называют *общим законом сопротивления*:

$$I = \frac{h_l}{l} = av^n, \quad (3.3)$$

где I — удельные потери напора по длине (или гидравлический уклон);

a — коэффициент, зависящий от рода жидкости, от формы и размеров русла;

n — показатель степени, изменяющийся от 1 до 2.

При *ламинарном режиме* движения ($Re \leq 2300$, $n = 1$, $h_l \sim v$) коэффициент Дарси не зависит от шероховатости стенок и может быть определен по формуле Пуазейля:

$$\lambda = 64 / Re. \quad (3.4)$$

При *турбулентном режиме* зависимость h_l от v более сложная, показатель степени n изменяется в пределах от 1,75 до 2. Вследствие этого в турбулентном режиме выделяют три зоны с различным *законом сопротивления*. Коэффициент Дарси для каждой из зон определяют по

соответствующим формулам. При этом важным является понятие гидравлических «гладких» и «шероховатых» труб (рис.3.1).

Измерения скоростей показывают, что при турбулентном режиме у стенок имеется тонкий слой жидкости, в котором частицы, подторможенные и направленные стенкой, сохраняют в основном слоистый характер. Этот слой называют *пограничным* или *вязким пристенным слоем* и толщину его обозначают δ :

$$\delta = \frac{32,5d}{Re\sqrt{\lambda}} \quad (3.5)$$

Определение «гидравлически гладких» стенок связано с толщиной этого слоя следующим образом. Если пристенный слой полностью перекрывает выступы шероховатости ($\delta > \Delta$ рис. 3.1, а), то стенки называются «гидравлически гладкими», если $\delta < \Delta$ (рис. 3.1, б), то стенки считаются «шероховатыми».



Рис.3.1. К определению понятий гидравлических «гладких» и «шероховатых» труб

Границы зон турбулентного режима можно определить различными способами, но наиболее применяемыми в последнее время считаются рекомендации А.Д. Альбиула. Критерием для определения зоны турбулентности является число Re и Δ/d , где Δ - эквивалентная шероховатость. Обычно естественная шероховатость имеет многообразные пере-

гулярные формы (рис. 3.1, а, б) и установить ее среднее значение невозможно. Поэтому параметр шероховатости вводится как условная величина, определяемая по специальной шкале искусственной однородной шероховатости (рис. 3.1, в). Значения ее приводятся в справочной литературе в зависимости от материала поверхности, способа изготовления, периода и условий эксплуатации. При необходимости Δ определяется опытным путем.

При турбулентном режиме могут быть рекомендованы следующие зависимости для определения коэффициента Дарси.

1. «Гидравлически гладкие» стенки ($h_f \sim v^{1,75}$).

К началу этой области будем относить числа $Re > 2300$. Границу конца гладкостенного течения определим по соотношению

$$Re = 20 d / \Delta_s$$

т. е. будем считать течение, происходящим вдоль гладких стенок, если

$$2300 < Re \leq 20d/\Delta_s \quad (3.6)$$

Для этой зоны может быть рекомендована формула Блазиуса:

$$\lambda = 0,3164 / Re^{0,25} \quad (3.7)$$

2. Область *доквадратичного закона сопротивления* шероховатых стенок соответствует турбулентному течению с числами Рейнольдса

$$20d/\Delta_s < Re < 500d/\Delta_s \quad (3.8)$$

Коэффициент λ в этой области определяется по формуле Альбиула

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_s}{d} \right)^{0,25} \quad (3.9)$$

3. Область *квадратичного закона сопротивления* характеризуется тем, что потери напора пропорциональны *квадрату* скорости: $h_f \sim v^2$.

Границей начала данной области – области автомодельности турбулентного режима – можно считать число Рейнольдса

$$Re = 500d / \Delta_r$$

В этой области вязкий слой практически разрушен и не оказывает влияния на потери напора, при этом δ минимально возможное и постоянное, а коэффициент гидравлического трения не зависит от числа Рейнольдса.

Итак, при

$$Re \geq 500d / \Delta_r \quad (3.10)$$

формулы для определения коэффициента Дарси:

Никурадзе

$$\lambda = (1,74 + 2 \lg(r / \Delta_r))^{-2} \quad (3.11)$$

Шифринсона

$$\lambda = 0,11(\Delta_r / d)^{0,25} \quad (3.12)$$

На рис.3.2 представлена схема для выбора теоретической расчетной формулы коэффициента λ , обобщающая изложенные выше теоретические положения.

3.2. Выполнение лабораторной работы

3.2.1. Цель лабораторной работы

1. Определить опытным путем коэффициент гидравлического трения, коэффициент Дарси $\lambda_{\text{тп}}$ в трубопроводе при различных скоростях движения воды.
2. Рассчитать теоретическое значение коэффициента Дарси $\lambda_{\text{теор}}$ в соответствии с режимом движения воды и зоной сопротивления.

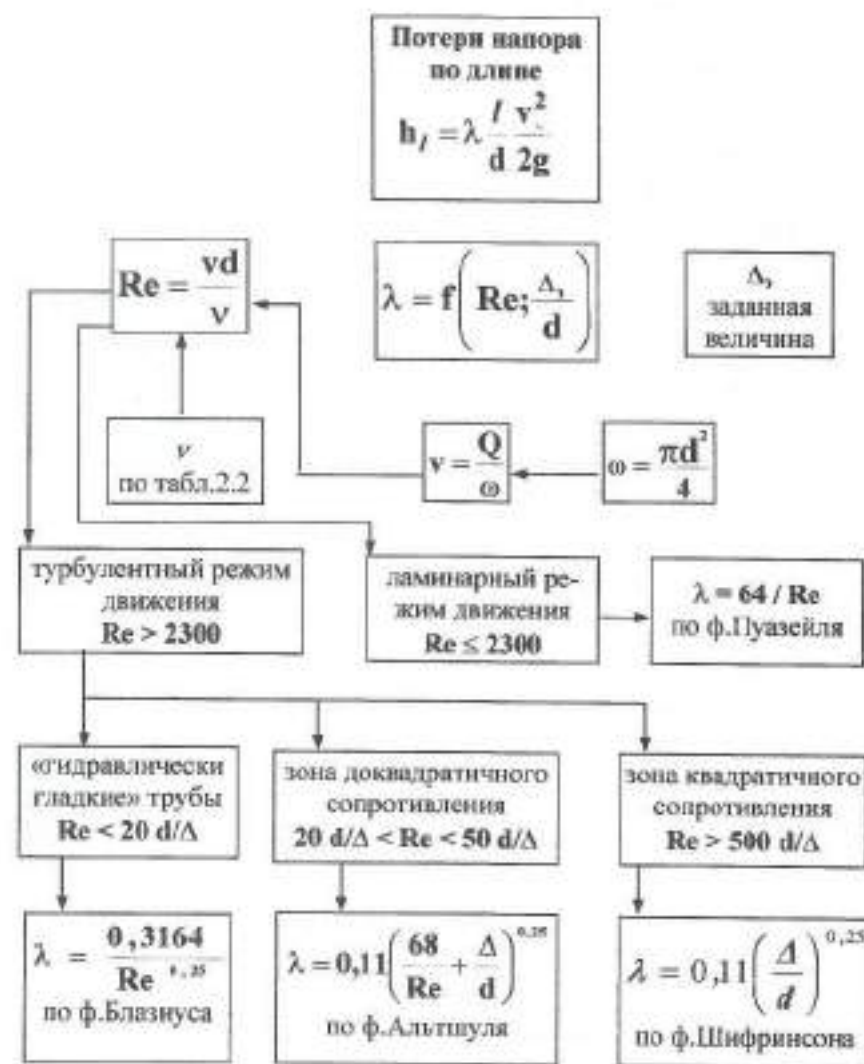


Рис. 3.2. Схема выбора теоретической формулы для расчета коэффициента гидравлического трения $\lambda_{\text{теор}}$

3.2.2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис 3.3) состоит из напорного бака 1, трубопровода постоянного диаметра 2, вентиля 3 для регулирования скорости движения воды, пьезометров 4, присоединенных к штуцерам в начале и в конце испытуемого участка трубы, мерной ёмкости 5.

Лабораторные работы выполняются при установившемся движении, поэтому для поддержания постоянного напора в напорном баке 1 предусмотрена сливная труба 7. Подпитка напорного бака осуществляется от центробежного насоса или из водопроводной сети по соответствующим трубам 8.

3.2.3. Порядок выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа по определению коэффициента гидравлического трения λ может быть выполнена по указанию преподавателя на одной из труб: с диаметром $d = 36$ мм или $d = 20$ мм. Длина экспериментального участка $l = 4,4$ м.

В процессе проведения работы опытные значения коэффициента гидравлического трения $\lambda_{\text{оп}}$ следует определить при различной средней скорости движения воды в трубе. Первый опыт можно начать с небольшой скорости и затем от опыта к опыту увеличивать скорость, или в обратной последовательности: начать с максимальной скорости и уменьшать ее от опыта к опыту.

Последовательность проведения каждого опыта.

1. Перед началом работы осмотреть установку. В табл. 3.1. внести значения диаметра и длины рабочего участка испытуемой трубы. Проверить подключение пьезометров, установить их нумерацию: 1 – в начале участка трубы; 2 – в конце трубы по ходу движения жидкости. Убедиться, что нет воздушных пробок в соединительных резиновых трубах: показания пьезометра должны быть одинаковы.

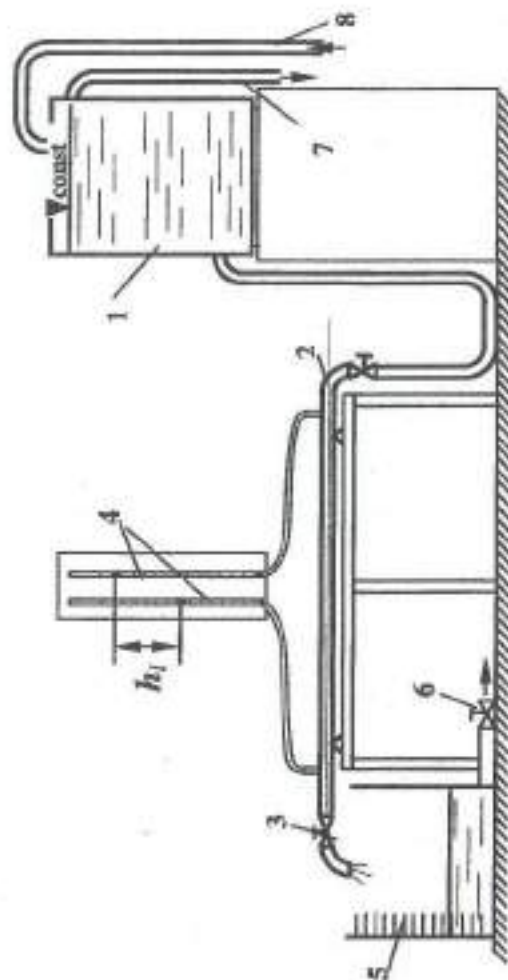


Рис. 3.3. Установка для изучения потерь напора по длине:
1 – напорный бак; 2 – исследуемая труба; 3 – вентиль; 4 – пьезометры; 5 – мерный бак;
6 – сливная труба; 7 – подпиточная труба; 8 – подпиточная труба

- Открыть регулировочный вентиль 3, установить определенную скорость движения воды, одновременно с помощью подпиточной трубы (8) (или насоса) и сливной трубы 7 установить постоянный уровень воды в напорном баке. Таким образом обеспечить установившееся движение воды в экспериментальной установке.
- Перекрыть вентиль 6 на сливной трубе мерной емкости.
- Перейти к снятию замеров и показаний приборов:
 - снять показания пьезометров 4;
 - с помощью секундомера определить время наполнения определенного объема воды в мерной емкости 5. Цена деления в мерной емкости 10 литров (10^4 см^3);
 - измерить температуру воды в мерном баке.
- Последовательно провести 5-6 опытов при различных скоростях, полностью используя возможности установки. Если мерный бак 5 переполняется в процессе работы, можно, открыв вентиль 6, слить воду из него, снова закрыть вентиль и продолжить работу до завершения.
- Все исходные и опытные данные занести в табл. 3.1. и обработать результаты экспериментов.

3.2.4. Обработка результатов лабораторной работы

- Рассчитывается площадь живого сечения трубы:

$$\omega = \pi d^2 / 4.$$

- В соответствии с температурой по табл. 2.2. выбирается кинематический коэффициент вязкости воды ν .

- Находится величина расхода воды в каждом опыте:

$$Q = W / t.$$

- Определяется средняя скорость воды в каждом опыте:

$$v = Q / \omega.$$

- Вычисляются потери напора:

$$h_l = p_1 / (\rho g) - p_2 / (\rho g). \quad (3.13)$$

- Рассчитывается опытное значение коэффициента гидравлического трения:

$$\lambda_{\text{оп}} = \frac{2gdh_l}{l \cdot v^2}. \quad (3.14)$$

- Для каждого опыта вычисляется число Рейнольдса Re

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

и определяется режим движения воды.

- В случае турбулентного режима определяются граничные значения чисел Re для установления области сопротивления

$$20d / \Delta_s = ? \quad 500d / \Delta_s = ?$$

Сравнивая полученные значения с числами Re в каждом опыте, определяют зону турбулентного течения.

- В соответствии с выполненными расчетами руководствуясь теоретическими положениями (рис.3.2), выбирается теоретическая формула для определения коэффициента Дарси $\lambda_{\text{теор}}$.

- Затем для сравнения полученных значений $\lambda_{\text{теор}}$ и $\lambda_{\text{оп}}$ вычисляется величина отклонения ϵ опытного значения коэффициента от теоретического:

$$\epsilon = (|\lambda_{\text{теор}} - \lambda_{\text{оп}}| / \lambda_{\text{теор}}) \cdot 100\%. \quad (3.15)$$

Результаты обработки измерений заносятся в таблицу 3.1.

- По заданию преподавателя для одного из опытов может быть выполнен расчет погрешности определения $\lambda_{\text{оп}}$. Для этого формула (3.14) может быть представлена в виде:

$$\lambda_{\text{оп}} = \frac{h_l d^5 t^2}{0,0827 W^2} \quad (3.16)$$

и тогда расчет ошибки может быть выполнен по зависимости:

$$\delta \lambda = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta h_l}{h_l} + \frac{5 \Delta d}{d} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{2 \Delta W}{W} + \frac{2 \Delta t}{t}. \quad (3.17)$$

Таблица 3.1

Определение коэффициента гидравлического трения

Наименование параметров	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
1. Диаметр трубы d , см						
2. Длина рабочего участка l , см						
3. Площадь живого сечения ω , см ²						
4. Эквивалентная шероховатость Δ , см						
5. Температура воды T , °C						
6. Кинематический коэффициент вязкости воды ν , см ² /с						
7. Объем воды в мерном баке W , см ³						
8. Время заполнения объема t , с						
9. Расход воды Q , см ³ /с						
10. Средняя скорость воды V , см/с						
11. Показание первого пьезометра $p_1/(pg)$, см						
12. Показание второго пьезометра $p_2/(pg)$, см						
13. Потери напора h_L , см						
14. Опытное значение коэффициента $\lambda_{оп}$						
15. Число Рейнольдса Re						
16. Режим движения и область сопротивления турбулентного режима						
17. Теоретическое значение коэффициента $\lambda_{теор}$						
18. Отклонение δ , %						

Абсолютные погрешности измеряемых величин $\Delta_{...}$ принимаются следующим образом:

$\Delta d = 0,1$ мм; $\Delta W = 0,1$ наименьшего деления шкалы мерного бака; $\Delta t = 0,1$ с; $\Delta h_L = 0,5$ цены деления шкалы пьезометра; погрешностью измерения длины трубы можно пренебречь вследствие малости.

3.2.5. Вопросы для самопроверки и составления выводов по работе

1. Что такое гидравлические сопротивления, какие виды гидравлических сопротивлений учитывают в инженерных расчетах?
2. Каковы причины, вызывающие потери напора по длине? Какие имеются формулы для определения потерь по длине?
3. От каких параметров зависит коэффициент гидравлического трения?
4. Какие зоны турбулентного режима различают?
5. Какой смысл вкладывается в понятия «гидравлически гладкие» и «гидравлически шероховатые» трубы?
6. Что такое «эквивалентная шероховатость», как ее можно определить?
7. Какие имеются рекомендации для определения границ зон турбулентного режима?
8. Какие показатели степени у скорости в общем законе сопротивления при различных режимах и в разных зонах сопротивления турбулентного режима?
9. Как в данной работе экспериментально определяются потери напора по длине?
10. Из каких элементов состоит лабораторная установка?
11. Какие замеры выполняются в каждом опыте на установке?

Отчет составляется на стандартных листах формата А4 и содержит следующие моменты:

- краткие теоретические положения, обязательно включающие используемые расчетные формулы с расшифровкой обозначений и их размерностями;
- схему установки с названиями входящих в нее элементов;
- выводы по работе, в которых даются ответы на вопросы: 1, 2, 3, 7, а также приводятся значения границ зон турбулентного режима для данной трубы и обоснование выбранных расчетных формул для теоретического значения коэффициента Дарси; в заключении отмечаются опыты с наилучшей сходимостью опытных и теоретических значений коэффициента.

Определение местных потерь напора и коэффициентов местных сопротивлений

4.1. Теоретические положения

Местными сопротивлениями называются различного рода устройства, при прохождении через которые меняется направление движения потока жидкости или величина скорости, или и то, и другое. К местным сопротивлениям относятся краны, задвижки, повороты труб, тройники, внезапное сужение потока, внезапное расширение и т.п.

Потери напора в местном сопротивлении рассчитываются по формуле Вейсбаха:

$$h_r = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (4.1)$$

где ζ - коэффициент местного сопротивления, показывающий долю скоростного напора, затрачиваемого на преодоление данного сопротивления.

Течение жидкости через местные сопротивления - очень сложное явление, и теоретические значения коэффициентов ζ получены лишь для немногих видов местных сопротивлений.

Для большинства местных сопротивлений значения коэффициентов ζ получены из экспериментов и приводятся в гидравлических справочниках.

На величину коэффициента ζ влияют многие факторы, в том числе геометрические параметры устройства, режим течения, шероховатость его стенок. Для запорных устройств (кранов, вентилей, задвижек, клапанов, дросселей и т. д.) большое влияние на величину ζ оказывает степень открытия.

Рассмотрим подробнее несколько видов местных сопротивлений, а именно тех, которые используются в данной лабораторной работе.

Вентиль (рис.4.1, а). Это очень распространенный элемент запорной арматуры. Выпускается промышленностью с различной конструкцией и конфигурацией внутренних клапанов. На рисунке показана примерная структура потока при прохождении вентиля. При различном открытии вентиля коэффициент ζ будет иметь свои значения. Кроме того, эти значения зависят от диаметра трубопровода, от расположения делительных стенок. В справочной литературе значения коэффициента ζ чаще всего приводятся для полностью открытого вентиля.

Диафрагма (измерительная шайба) (рис.4.1, б). Такое устройство часто применяется в качестве измерительного прибора для определения величины расхода. В самом деле, потери напора h_r пропорциональны напору $v^2/(2g)$ и, следовательно, расходу жидкости Q . Если предварительно выполнить тарировочные работы, т.е. опытным путем получить для диафрагмы зависимость $h_r=f(Q)$ или, наоборот, $Q=f(h_r)$ то, построив график этой зависимости (рис.4.1, в), можно его применять в дальнейшем для определения величины расхода по показаниям пьезометров или дифманометра.

Значение коэффициента сопротивления ζ для диафрагмы зависят от размера проходного отверстия.

Пробковый кран (4.1, г). Эти устройства часто применяются в гидросистемах для регулирования расхода, для включения и выключения системы. Коэффициент ζ зависит от угла поворота пробки относительно оси. Примерные значения ζ при турбулентном режиме течения с числами $Re > 10^4$ приведены в табл.4.1.

Таблица 4.1

Коэффициент сопротивления пробкового крана

$\alpha, \text{град}$	5	10	20	30	40	50	55	67
ζ	0,05	0,31	1084	6,15	20,7	95,3	275	∞

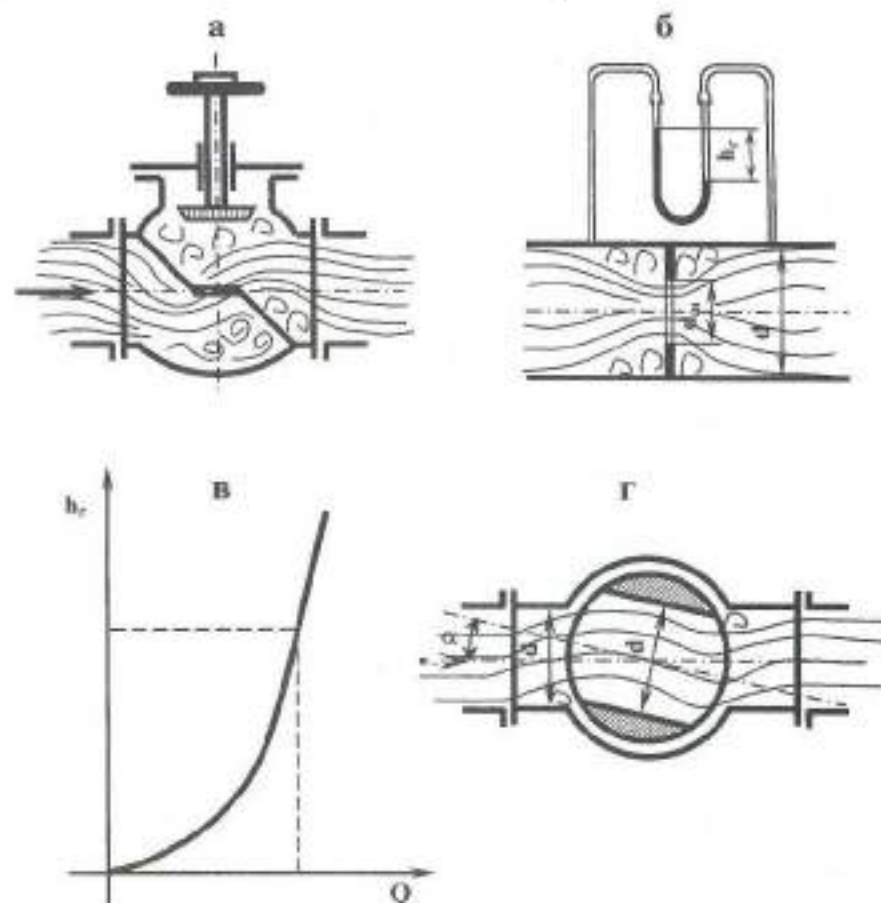


Рис. 4.1. Примеры местных сопротивлений

Значения коэффициентов ζ для местных сопротивлений строго индивидуальны и даже при соблюдении рекомендаций по установке стандартной аппаратуры в каждом случае могут появиться отклонения значений ζ от табличных справочных данных. Поэтому важно уметь определять коэффициенты сопротивлений опытным путем.

4.2. Выполнение лабораторной работы

4.2.1. Цель лабораторной работы

1. Определить опытным путем коэффициенты местных сопротивлений различных устройств: вентиля, пробкового крана, диафрагмы.
2. Изменить угол открытия пробкового крана в пределах от 5° до 45° и, определив коэффициенты сопротивления пробкового крана при разных углах открытия, сравнить опытные значения с табличными.

4.2.2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для изучения потерь напора в местных сопротивлениях аналогична установке для определения потерь напора по длине. Обе питаются от одного напорного бака, смонтированы на одной раме, имеют аналогичные измерительные приборы.

Лабораторная установка (рис. 4.2) состоит из напорного бака 1, трубопровода постоянного диаметра 2 с вентилем 3 для регулирования расхода и с рабочими местными сопротивлениями: вентилем 4; пробковым краном 5, диафрагмой 6. На трубе у каждого местного сопротивления, до и после него, имеются штуцеры, к которым присоединены пьезометры 7. Мерная емкость 8 оборудована сливом 9. У напорного бака 1 для обеспечения постоянного напора имеется подпиточная 10 и сливная 11 трубы.

4.2.3. Порядок выполнения лабораторной работы

Перед началом выполнения опытов осмотреть установку, внимательно разобраться с присоединением пьезометров к местным сопротивлениям, установить их нумерацию по ходу движения жидкости для каждого местного сопротивления. Убедиться, что в резиновых трубках, идущих к пьезометрам, нет пузырьков воздуха.

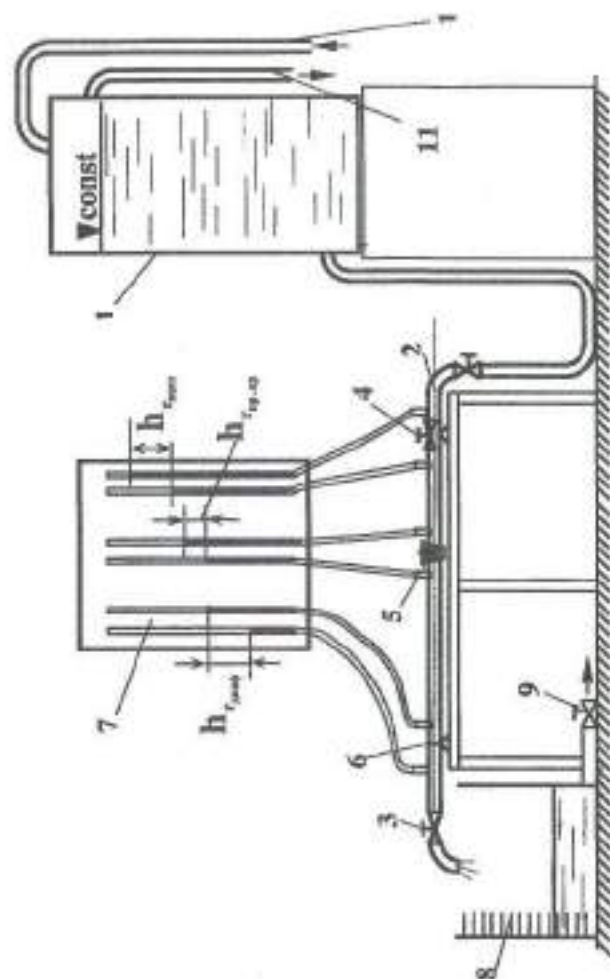


Рис. 4.2. Установка для изучения потерь напора в местных сопротивлениях:
1 – напорный бак; 2 – исследуемая труба; 3 – вентиль для регулирования скорости;
4 – вентиль; 5 – пробковый кран; 6 – диафрагма (плавик); 7 – пьезометры; 8 – мерный бак; 9 – сливная труба; 10 – подпиточная труба; 11 – сливная труба

На установке можно проводить различные опыты, в том числе тарирование измерительной диафрагмы, определение зависимости коэффициентов сопротивления пробкового крана от угла поворота пробки.

Чаще всего определяются коэффициенты ζ для всех сопротивлений при двух различных расходах воды.

Порядок эксперимента следующий:

1. Открыть полностью ventиль 4 и пробковый кран 5.
2. Ventилью 3 дать значительное открытие, так чтобы установился развитый турбулентный режим (открывать ventиль 3 можно до тех пор, пока есть показания во 2-ом пьезометре измерительной шайбы).
3. Подпиточным краном или насосом установить постоянный уровень воды в напорном баке.
4. Перекрыв ventиль слива мерного бака, измерить время заполнения установленного объема. Снять показание всех пьезометров (у каждого местного сопротивления). Открыть слив и измерить температуру воды в мерном баке. Данные опыта заносятся в таблицу 4.2.
5. Следующая серия опытов проводится при измерении угла открытия пробкового крана. Гляечным ключом пробка поворачивается на определенный угол в интервале от 5° до 45° . Опыт повторяется при новом расходе.

4.2.4. Обработка результатов лабораторной работы

Обработка экспериментальных данных аналогична обработке данных лабораторной работы №3 по определению потерь напора на трение по длине. В расчетах принять ускорение свободного падения $g = 981 \text{ см/с}^2$.

Таблица 4.2.

Определение коэффициентов местных сопротивлений

Наименование параметров	Ventиль		Пробковый кран		Диафрагма	
	1 опыт	2 опыт	1 опыт	2 опыт	1 опыт	2 опыт
1. Диаметр трубы d , см						
2. Площадь живого сечения ω , см^2						
3. Температура воды T , $^\circ\text{C}$						
4. Кинематический коэффициент вязкости воды ν , $\text{см}^2/\text{с}$						
5. Объем воды в мерном баке W , см^3						
6. Время опыта t , с						
7. Расход воды Q , $\text{см}^3/\text{с}$						
8. Средняя скорость воды v , см/с						
9. Показание первого пьезометра $p_1/(\rho g)$, см						
10. Показание второго пьезометра $p_2/(\rho g)$, см						
11. Потери напора h_p , см						
12. Коэффициент местного сопротивления ζ						
13. Число Рейнольдса Re , режим течения						

1. Рассчитывается площадь живого сечения трубы:

$$\omega = \pi d^2 / 4.$$

2. В соответствии с температурой по табл. 2.2 выбирается кинематический коэффициент вязкости воды ν .

3. Находится величина расхода воды в каждом опыте:

$$Q = W / t.$$

4. Определяется средняя скорость воды в каждом опыте:

$$v = Q / \omega.$$

5. Вычисляются местные потери напора:

$$h_r = p_1 / (\rho g) - p_2 / (\rho g). \quad (4.2)$$

6. Определяется значение коэффициентов местных сопротивлений:

$$\zeta = 2gh_r / v^2. \quad (4.3)$$

7. Для каждого опыта вычисляется число Рейнольдса Re

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

и определяется режим движения воды.

8. Все расчетные данные заносятся в таблицу 4.2.

9. По заданию преподавателя для одного из опытов может быть выполнен расчет погрешности определения ζ . Для этого формула (4.3) может быть представлена в виде:

$$\zeta = 12,08 h_r d^4 t^2 / W^2 \quad (4.4)$$

и тогда расчет относительной систематической погрешности может быть выполнен по зависимости:

$$\delta \zeta = \frac{\Delta \zeta}{\zeta} = \frac{\Delta h_r}{h_r} + \frac{4 \Delta d}{d} + \frac{2 \Delta W}{W} + \frac{2 \Delta t}{t}. \quad (4.5)$$

Абсолютные погрешности измеряемых величин $\Delta \dots$ принимаются следующим образом:

$\Delta d = 0,1$ мм; $\Delta W = 0,1$ наименьшего деления шкалы мерного бака;
 $\Delta t = 0,1$ с; $\Delta h_r = 0,5$ цены деления шкалы пьезометра.

4.2.5. Вопросы для самопроверки и составления выводов по работе

1. Что такое местное сопротивление?
2. По какой формуле рассчитываются местные потери напора?
3. Какие местные сопротивления используются при выполнении лабораторной работы?
4. Как экспериментально в данной работе определялись местные потери напора?
5. От чего зависит коэффициент местного сопротивления для запорной аппаратуры?
6. Из каких элементов состоит лабораторная установка?
7. Какие измерения выполняются в каждом опыте?
8. Для чего измеряется температура в опыте?

Состав отчета

Отчет составляется на стандартных листах формата А4 и содержит следующее:

- краткие теоретические положения, обязательно включающие используемые расчетные формулы с расшифровкой обозначений и их размерностями;
- схему установки с названиями входящих в нее элементов и построением пьезометрической линии для одного из опытов;
- выводы по работе, в которых даются ответы на вопросы: 1, 2, 3, 4. Так же следует указать, каким был угол открытия *пробкового крана* в 1 и 2 опытах, как изменилось значение коэффициента сопротивления крана при изменении угла. Сравнить экспериментальные значения коэффициента с табличными (таб. 4.1). Если по таблице интерполирование значения коэффициента $\zeta_{кр}$ не даст достаточной точности, то значение коэффициента $\zeta_{кр}$ требуется найти по графику (рис. 4.3).

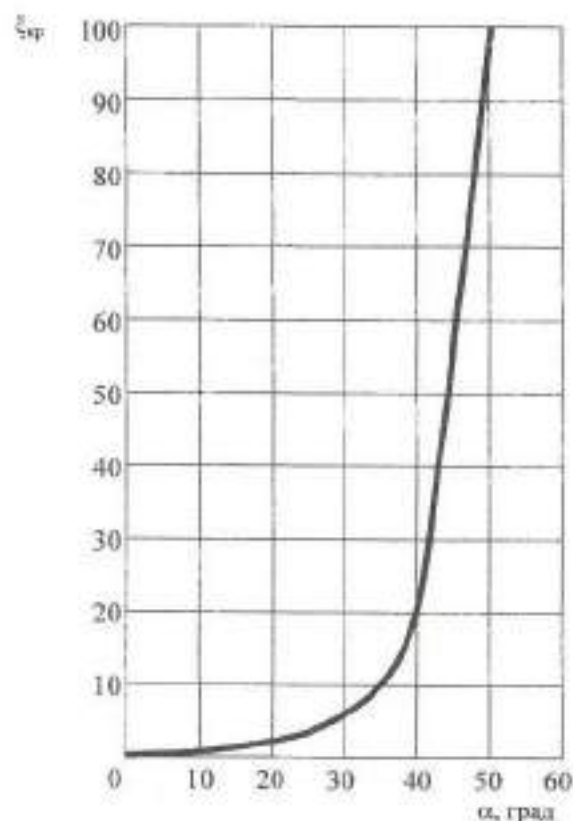


Рис. 4.3. График зависимости коэффициента сопротивления пробкового крана от угла поворота

Истечение жидкости через отверстия и насадки

5.1. Теоретические положения

В инженерной практике часто приходится встречаться с явлениями истечения жидкости через отверстия различной формы и через насадки - короткие патрубки разной конфигурации длиной $(3+5)d_{отв}$ (диаметров отверстий), к которым они присоединены. Через отверстия и насадки происходит перетекание жидкости из одного резервуара в другой, опорожнение резервуаров. Насадки и их комбинации являются конструктивными элементами различных аппаратов и устройств.

Отверстия различают малые и большие, в тонкой или толстой стенке. Истечение может происходить при постоянном или переменном напоре.

Насадки по форме патрубка могут быть цилиндрические (внутренние и внешние), конические (сходящиеся и расходящиеся) и конусообразные, выполненные по форме выходящей струи.

Отверстие можно считать малым, если его высота не превышает $0,1H$. При этом условии скорость в точках сжатого сечения (на расстоянии полу диаметра, рис.5.1) практически одинакова и может быть определена по формуле

$$v = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (5.1)$$

где H - напор над центром тяжести отверстия;

φ - коэффициент скорости, которым учитываются потери энергии на формирование струи, выходящей из отверстия с коэффициентом местного сопротивления $\zeta_{отв}$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{отв}}} \quad (5.2)$$

α - коэффициент Кориолиса, $\alpha = 1$ при турбулентном режиме.

Площадь сжатого сечения струи определяется через площадь отверстия ω и коэффициент сжатия ϵ : $\omega_{\text{сж}} = \epsilon \omega$, тогда $\epsilon = \omega_{\text{сж}} / \omega$ и для круглого отверстия

$$\epsilon = d_{\text{сж}}^2 / d^2. \quad (5.3)$$

При установившемся движении пропускная способность Q (расход) малых отверстий и насадков вычисляется по зависимости:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad (5.4)$$

в которой μ - коэффициент расхода, связанный с остальными коэффициентами соотношением

$$\mu = \epsilon \phi. \quad (5.5)$$

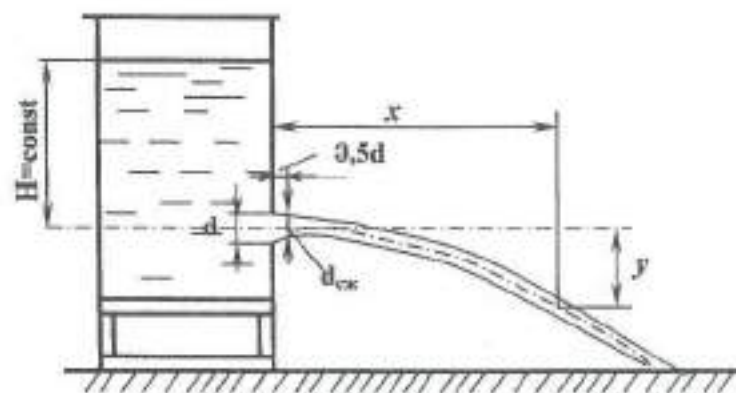


Рис. 5.1. Истечение жидкости через малое отверстие в тонкой стенке

Коэффициенты истечений $\zeta_{\text{сж}}$, ϵ , ϕ , μ зависят от формы отверстий и насадков, характера обработки кромок отверстия, от полноты и совершенства сжатия струи, а для конических насадков - от угла конусо-

сти. Для некоторых видов отверстий и насадков значения коэффициентов приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Коэффициенты скорости, сжатия струи и расхода

Вид конструктивного элемента	ϕ	ϵ	μ
Круглое отверстие в тонкой стенке с полным совершенным сжатием	0,97	0,64	0,62
Внешний цилиндрический насадок	0,82	1,00	0,82
Конический сходящийся насадок с углом конусности $13^{\circ}24'$	0,96	0,98	0,94
Конический расходящийся насадок с углом конусности 7°	0,50	1,00	0,50

Явление сжатия струи весьма сложно: форма поперечного сечения струи изменяется по сравнению с формой сечения струи в самом отверстии. Это явление называется *инверсией струи*. Так, при вытекании жидкости из круглого отверстия струя имеет в сжатом сечении форму эллипса; из квадратного - форму креста; из треугольного - форму буквы γ .

Для вывода формул опытного определения коэффициентов истечения рассматривается свободное истечение струи через малое отверстие в тонкой стенке с полным совершенным сжатием. Траектория струи имеет форму параболы (рис. 5.1). Координаты траектории струи можно получить, допустив, что каждая частица струи движется, как свободная материальная точка, на которую действует только сила тяжести.

Тогда горизонтальное перемещение равно $x = vt$,

вертикальное - $y = gt^2/2$.

Исключив t , выразим скорость через координаты x и y

$v = x \sqrt{g/(2y)}$. Приравнявая полученное выражение к скорости по формуле (5.1), получим

$$\varphi = \frac{x}{2\sqrt{yH}} \quad (5.6)$$

Отличительной особенностью истечения жидкости через гидравлические насадки является образование сжатого сечения внутри насадки на расстоянии $0,5d$ и возникновение вакуума в области сжатия струи. Сужаясь на входе в насадку, как при истечении через отверстие, струя жидкости затем расширяется, заполняя все сечение. Сжатие струи отсутствует в конoidalном насадке, форма которого очерчена по форме вытекающей струи.

Наличие вакуума внутри насадка, присоединенного к отверстию, способствует дополнительному подосу жидкости и увеличению пропускной способности отверстия, т.к. для насадка действующий напор увеличивается. Он складывается из пьезометрического (H) и вакуумметрического ($H_{\text{вак}}$) напоров. Для насадков величина вакуума составляет: цилиндрический $\approx 0,75H$; конический сходящийся $\approx 0,8H$; конический расходящийся $\approx 0,85H$.

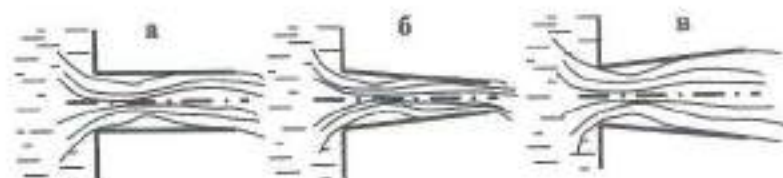


Рис.5.2. Истечение жидкости через насадки
а - внешний цилиндрический насадок, б - конический сходящийся насадок, в - конический расходящийся насадок

Особенности истечения жидкости через насадки — наличие вакуума — учитываются величиной коэффициентов скорости φ , сжатия ϵ и расхода μ (табл.5.1).

5.2. Выполнение лабораторной работы

5.2.1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является экспериментальное изучение процесса истечения жидкости через малое отверстие в тонкой стенке и насадки при постоянном напоре с определением коэффициентов скорости, сжатия и расхода.

5.2.2. Описание лабораторной установки

Установка для проведения лабораторных работ (рис.5.3) по изучению истечения жидкости через отверстия и насадки состоит из металлического напорного бака 1, на торцевой стенке которого имеются малое отверстие в тонкой стенке 2 и гидравлические насадки: внешний цилиндрический 3, конический расходящийся 4 и конический сходящийся 5. Краном 6 регулируется поступление воды в бак и поддерживается постоянный действующий напор H при проведении эксперимента. Напор H на уровне оси отверстия измеряется с помощью пьезометра 7. Подвижным координатником 8 измеряются координаты (x, y) вытекающей струи. Расход жидкости определяется объемным методом по установленному объему и времени заполнения его в подвижном мерном баке 9. Кран 10 служит для выпуска воздуха из бака 1 при заполнении его водой. При помощи клапанов 11 осуществляется открытие отверстия и насадков. Для гидравлических насадков величина вакуума определяется с помощью U-образного вакуумметра 12.

5.2.3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. С помощью штангенциркуля проводятся замеры геометрических размеров отверстия и насадков, а именно, внутреннего диаметра. Линейкой измеряется координата y на подвижном координатнике 8. Это расстояние от оси отверстия до натянутой нити в координатнике.

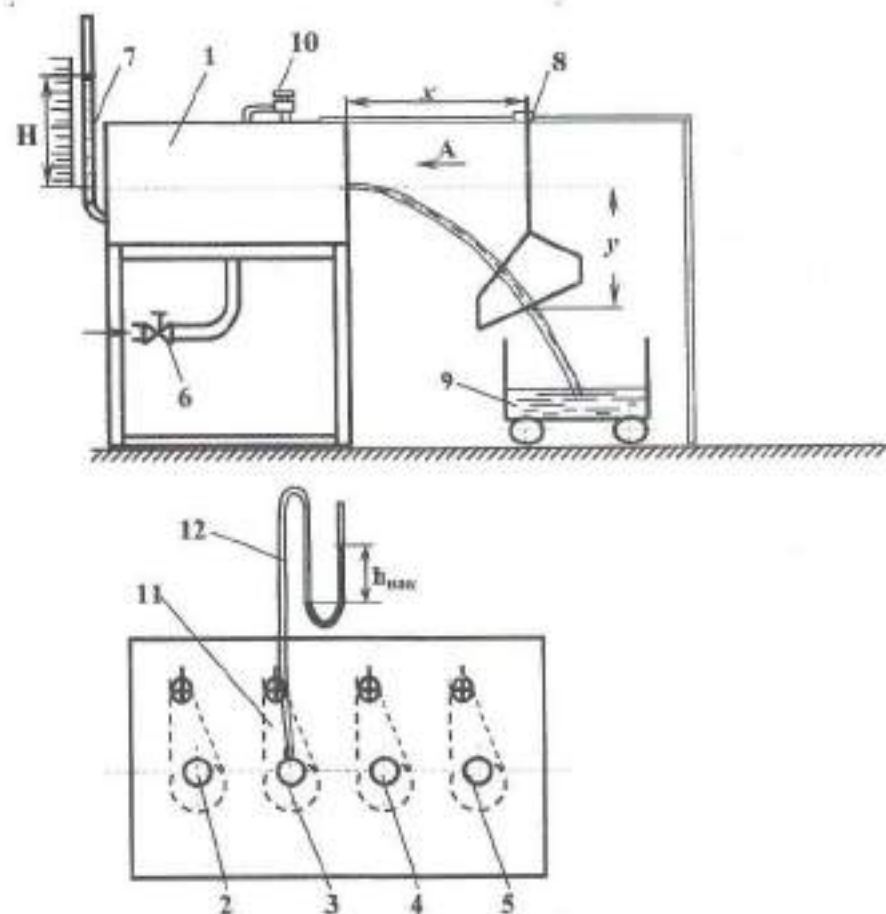


Рис.5.3. Схема установки для изучения истечения жидкости через отверстие и насадки

Данные вносятся в табл. 5.2 для отверстия или в табл. 5.3 для насадков.

2. Открывается регулировочный кран 6. Заполняется напорный бак 1 и устанавливается некоторый действующий напор H . При заполнении напорного бака установка освобождается от воздуха путем открытия крана 10.

3. Поворотом клапана 11 открывается малое отверстие или один из насадков в зависимости от цели эксперимента.

4. При помощи регулировочного вентиля 6 устанавливается постоянный действующий напор H , который фиксируется по пьезометру (7).

5. Производится визуальное наблюдение за характером истечения жидкости, видом вытекающей струи, ее траекторией. Для малого отверстия наблюдается явление инверсии струи.

6. Одновременно измеряются и записываются следующие параметры: действующий напор H по пьезометру 7; время t наполнения установленного объема жидкости в подвесном баке, принимающем вытекающую струю; координата x траектории вытекающей струи, при этом натянутая нить координатника 8 должна быть установлена по оси струи; диаметр струи в сжатом сечении $d_{сж}$ на расстоянии $0,5d$ от входа в отверстие.

Все данные вносятся в соответствующие таблицы: табл. 5.2 или табл. 5.3.

7. При истечении жидкости через насадки замеряется величина вакуума с помощью U - образного вакуумметра 9, заполненного жидкостью, плотность которой больше плотности воды, например, четыреххлористым углеродом CCl_4 или ртутью.

В табл. 5.3 вносится величина $h_{ман}$, равная высоте столба жидкости в U - образном манометре и соответствующая вакууму.

При проведении опытов с насадками наличие вакуума можно наглядно продемонстрировать следующим образом: на расстоянии $0,5d$ в месте сжатия струи и возникновения вакуума выводится штуцер, на который одевается резиновая трубка с зажимом, трубка опускается в сосуд с подкрашенной жидкостью. При открытии зажима подкрашенная жидкость вследствие вакуума всасывается в насадок, и струя, выходящая из насадка, окрашивается.

8. В конце опыта закрывается клапан 11, а по окончании всех опытов закрывается кран 6 на трубе, подающей воду в напорный бак 1. Затем выпускается вода из напорного бака.

Таблица 5.2

Истечение жидкости через малое отверстие

Наименование параметров	№ опыта				
	1	2	3	4	5
1. Диаметр отверстия d , см					
2. Площадь живого сечения ω , см ²					
3. Действующий напор H , см					
4. Объем воды в мерной емкости W , см ³					
5. Время наполнения принятого объема t , с					
6. Объемный расход воды Q , см ³ /с					
7. Коэффициент расхода μ					
8. Координата траектории струи x , см					
9. Координата траектории струи y , см					
10. Коэффициент скорости φ					
11. Коэффициент сжатия ϵ					
12. Диаметр струи в сжатом сечении $d_{сж}$, см					
13. Опытное значение коэффициента сжатия $\epsilon_{оп}$					

Таблица 5.3

Истечение жидкости через гидравлические насадки

Наименование параметров	Цилиндрический насадок		Конический расходный насадок		Конический сходящийся насадок	
	Опыты		Опыты		Опыты	
	1	2	1	2	1	2
1. Диаметр насадка d , см						
2. Площадь живого сечения ω , см ²						
3. Действующий напор H , см						
4. Показание вакуумметра $h_{\text{вак}}$, см						
5. Вакуумметрический напор $H_{\text{вак}}$, см вод. ст.						
6. Расчетный напор $H_{\text{расч}} = H + H_{\text{вак}}$, см						
7. Объем воды в мерной емкости W , см ³						
8. Время наполнения принятого объема t , с						
9. Объемный расход воды Q , см ³ /с						
10. Коэффициент расхода μ						
11. Координата траектории струи x , см						
12. Координата траектории струи y , см						
13. Коэффициент скорости φ						
14. Коэффициент сжатия ϵ						

5.2.4. Обработка экспериментальных данных

Для удобства вычислений линейную размерность следует принять в см, поэтому ускорение $g = 981 \text{ см/с}^2$.

До начала обработки экспериментальных данных следует проверить, чтобы в табл. 5.2 или табл. 5.3 были внесены следующие величины, полученные в результате измерений:

d - диаметр отверстия или насадков;

H - действующий напор;

W - объем воды в мерной емкости;

t - время заполнения фиксированного объема воды;

x и y - координаты вытекающей струи;

$d_{сж}$ - диаметр сжатого сечения струи для малого отверстия;

$h_{вак}$ - показание вакуумметра для насадков.

При обработке опытных данных следует вычислить следующие параметры и внести в соответствующую таблицу.

1. Площадь живого сечения $\omega = \pi d^2 / 4$.
2. Объемный расход воды $Q = W / t$.
3. Коэффициент расхода $\mu = Q / \omega \sqrt{2gH}$.
4. Коэффициент скорости, определяется по формуле 5.2

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{отв}}}$$

5. Значение коэффициента сжатия ϵ определяется, исходя из величины коэффициентов расхода μ и скорости φ согласно формуле 5.5:

$$\epsilon = \mu / \varphi.$$

6. Опытное значение коэффициента сжатия ($\epsilon_{оп}$) можно получить путём геометрических замеров диаметра отверстия и диаметра струи в сжатом сечении и рассчитать по формуле 5.3: $\epsilon = d_{сж}^2 / d^2$.

7. Величину вакуумметрического напора в гидравлических насадках рассчитываем в см вод. ст., исходя из следующих рассуждений. Вакуумметрическое давление внутри насадка определяется по зависимости:

$$p_{вак} = \rho_{ж} g h_{вак} \quad (5.7)$$

где $\rho_{ж}$ - плотность жидкости в приборе (уточняется у преподавателя);

$h_{вак}$ - показание U-образного вакуумметра.

Вакуумметрический напор внутри насадка в см вод.ст. найдем из соотношения

$$H_{вак} (\text{см вод.ст.}) = p_{вак} / \rho_{вак} g = \rho_{ж} h_{вак} / \rho_{вак} \quad (5.8)$$

Показание $h_{вак}$ U-образного манометра следует снимать в см.

Закончив обработку экспериментальных данных, следует проанализировать полученные величины коэффициентов расхода, скорости и сжатия и сравнить их с табличными значениями, приведенными в табл. 5.1.

5.2.5. Вопросы для самопроверки и составления вывода по работе

1. Какое отверстие называется малым отверстием в тонкой стенке?
2. Какое явление называется инверсией струи?
3. Что такое гидравлический насадок? Классификация насадков.
4. Приведите расчетную формулу пропускной способности Q , (расхода) для отверстий и насадков.
5. Каковы особенности истечения жидкости через насадки?
6. Как влияет возникновение вакуума в насадке на величину расхода?
7. Какими коэффициентами характеризуется процесс истечения через отверстия и насадки? От чего зависит величина этих коэффициентов?
8. Опишите принцип действия лабораторной установки для изучения процесса истечения жидкости через отверстия и насадки.
9. Какие показания снимаются в процессе проведения лабораторной работы?

10. Какие параметры и коэффициенты рассчитываются, исходя из опытных данных?

11. Приведите примеры области применения отверстий и насадков.

Состав отчета

Отчет составляется на стандартных листах формата А4 и содержит следующее:

- краткие теоретические положения, обязательно включающие используемые расчетные формулы с расшифровкой обозначений и их размерностями;
- схему установки с названиями входящих в нее элементов;
- выводы по работе, в которых должны быть сформулированы цели и задачи эксперимента, описан процесс истечения жидкости через отверстие и особенности истечения через насадки. Провести сравнение опытных и табличных значений характеристических коэффициентов скорости, сжатия и расхода, дана оценка проведенным опытом.

Лабораторная работа № 6

Определение эквивалентной шероховатости трубопровода

6.1. Теоретические положения

При движении жидкости в напорном трубопроводе потери напора по длине трубы постоянного сечения зависят от геометрических размеров трубопровода l , d , скоростного напора $v^2/(2g)$ и коэффициента гидравлического трения λ и рассчитываются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

Как известно (см. лабораторную работу №3), коэффициент Дарси λ в общем случае является функцией числа Рейнольдса и шероховатости $\lambda = f(Re, \Delta/d)$. Движение воды в технических трубопроводах чаще всего происходит при турбулентном режиме, так как ламинарный режим в них весьма неустойчив. При турбулентном режиме определение коэффициента Дарси обусловлено областью (зоной) сопротивления. Понятие области сопротивления связано с шероховатостью и толщиной образующегося у стенки трубопровода пограничного слоя (или подслоя), называемого вязким (ранее – ламинарным) пристенным слоем, толщину которого можно оценить по формуле (3.5)

$$\delta = \frac{32,5d}{Re\sqrt{\lambda}}.$$

Данный слой характеризуется малыми скоростями движения жидкости, и его толщина влияет на характер трения при турбулентном режиме и на общий закон сопротивления (3.3)

$$l = \frac{h_f}{l} = av^n.$$

в связи с которым выделено 3 зоны сопротивления турбулентного режима.

Область гидравлически гладких труб. Это такое условие движения жидкости, когда толщина пограничного слоя больше высоты выступов абсолютной шероховатости, и она не влияет на величину коэффициента Дарси.

Согласно формуле (3.5) с увеличением числа Re толщина пограничного слоя δ уменьшается, происходит разрыв его выступами шероховатости. На величину коэффициента λ начинает влиять как число Рейнольдса, так и шероховатость трубы. Течение вдоль *гидравлически шероховатых стенок*, когда с возрастанием числа Рейнольдса толщина вязкого слоя уменьшается и при достижении определенного значения ($Re = 20 d / \Delta_s$), становится меньше абсолютной шероховатости, делится на 2 зоны.

Область доквадратичного сопротивления. Исследования показали, что потери по длине в этом случае пропорциональны скорости в степени $1,75 < n < 2,0$. Значения коэффициента λ для технических труб с неравномерной шероховатостью определяются по формуле А.Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_s}{d} \right)^{0,25} \quad (3.9)$$

Область квадратичного сопротивления. Для неравномерной шероховатости в технических трубах предельное значение числа Рейнольдса, при котором начинает действовать квадратичный закон сопротивления, можно с точностью до 5% принять $Re = 500d / \Delta_s$. В этом случае коэффициент сопротивления является функцией только шероховатости и не зависит от числа Re . Для зоны квадратичного сопротивления существует ряд формул для расчёта коэффициента λ , например, Б.Л. Шифринсона (3.12)

$$\lambda = 0,11 (\Delta_s / d)^{0,25}.$$

Обычно естественная действительная неравномерная шероховатость имеет многообразные нерегулярные формы (рис.3.1, а, б) и установить ее среднее значение невозможно. Поэтому параметр шероховатости вводится как условная величина - *гидравлически эквивалентная шероховатость* Δ_s (рис.3.1 в). Это - равномерно зернистая условная шероховатость, которая определяется путем измерения сопротивления. Она зависит:

- от материала и способа производства труб (например, чугунные трубы изготовленные центробежным литьем более гладкие, чем сварные); трубы, изготовленные одним и тем же способом, имеют одинаковую эквивалентную шероховатость независимо от диаметра;
- от свойства жидкости, протекающей по трубе; влияние жидкости на внутреннюю поверхность трубы может проявиться в виде коррозии стенок, образовании наростов и осадка;
- от продолжительности эксплуатации труб.

Рекомендации по величине Δ_s можно найти в справочной литературе (например, И.Е. Идельчик "Справочник по гидравлическим сопротивлениям") для различного вида труб, как металлических - стальных, чугунных, так и бетонных, асбестоцементных, деревянных, фанерных, стеклянных и т.д. Весьма важно уметь определять Δ_s опытным путем.

6.2 Выполнение лабораторной работы

6.2.1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является определение эквивалентной шероховатости трубы.

Так как лабораторная работа выполняется на установке, схема которой представлена на рис. 3.3, и для расчета Δ_s необходимо определить коэффициент Дарси, то описание лабораторной установки и выполнение

эксперимента следует смотреть в разделах 3.2.2 и 3.2.3. Исходные, экспериментальные и расчетные данные заносятся в таблицу 6.1.

6.2.2. Обработка результатов лабораторной работы.

1. Рассчитывается площадь живого сечения трубы:

$$\omega = \pi d^2 / 4.$$

2. В соответствии с температурой по табл. 2.2. выбирается кинематический коэффициент вязкости воды ν .

3. Находится величина расхода воды в каждом опыте:

$$Q = W / t.$$

4. Определяется средняя скорость воды в каждом опыте:

$$v = Q / \omega.$$

5. Вычисляются потери напора:

$$h_l = p_1 / (\rho g) - p_2 / (\rho g).$$

6. Рассчитывается опытное значение коэффициента гидравлического трения:

$$\lambda_{\text{оп}} = \frac{2gdh_l}{lv^2}.$$

7. Для каждого опыта вычисляется число Рейнольдса Re

$$Re = \frac{vd}{\nu}.$$

8. Вычисляется значение эквивалентной шероховатости Δ_s по зависимости, полученной из формулы Альтшуля:

$$\Delta_s = d \left[\left(\frac{\lambda}{0,11} \right)^4 - \frac{68}{Re} \right]. \quad (6.1)$$

9. Определяется по формуле (3.5) толщина пристенного вязкого слоя

$$\delta = \frac{32,5d}{Re \sqrt{\lambda}}.$$

10. По соотношению Δ_s и δ выясняется область сопротивления турбулентного режима.

6.2.3. Вопросы для самопроверки и составления выводов по работе

1. Какие потери напора называются потерями по длине? Расчетная формула потерь по длине.
2. Функцией каких параметров является коэффициент сопротивления λ ?
3. Что лежит в основе методики выбора расчетной зависимости коэффициента λ ?
4. Какие области сопротивления различают при турбулентном режиме?
5. От чего зависит коэффициент гидравлического трения в каждой области сопротивления?
6. Каковы расчетные формулы коэффициента λ для каждой области сопротивления при турбулентном режиме?
7. Как экспериментально определяются потери напора по длине? Из каких частей состоит лабораторная установка для определения потерь по длине и эквивалентной шероховатости труб?
8. Как определяется расход воды в системе?
9. Как рассчитывается скорость воды в трубе?
10. С какой целью определяется температура воды?
11. Как определяется режим движения воды? Каков он в опытах?
12. Как рассчитывается эквивалентная шероховатость?
13. Как определяется толщина вязкого слоя?
14. Какое заключение можно сделать из сравнения полученной эквивалентной шероховатости и толщины пограничного слоя?

Таблица 6.1

Определение эквивалентной шероховатости

Наименование параметров	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
1. Диаметр трубы d , см						
2. Длина рабочего участка l , см						
3. Площадь живого сечения ω , см ²						
4. Температура воды T , °C						
5. Кинематический коэффициент вязкости воды ν , см ² /с						
6. Объем воды в мерном баке W , см ³						
7. Время заполнения объема t , с						
8. Расход воды Q , см ³ /с						
9. Средняя скорость воды v , см/с						
10. Показание первого пьезометра $p_1/(pg)$, см						
11. Показание второго пьезометра $p_2/(pg)$, см						
12. Потери напора h_f , см						
13. Опытное значение коэффициента $\lambda_{оп}$						
14. Число Рейнольдса Re						
15. Эквивалентная шероховатость Δ_s , см						
17. Толщина вязкого слоя δ , см						
18. Область сопротивления						

Состав отчета

Отчет составляется на стандартных листах формата А4 и включает в себя:

- краткие теоретические положения, где обязательно приводятся используемые расчетные формулы с расшифровкой обозначений и их размерностями;
- схему установки с названиями входящих в нее элементов;
- выводы по работе, в которых даются ответы на следующие вопросы: 11, 12, 13, 14.

Список использованной литературы

1. *Альциуль А.Д.* Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1970.
2. *Гейер В.Г., Дулин В.С.* и др. Гидравлика и гидропривод. - М.: Недра, 1990.
3. *Константинов Н.М.* и др. Гидравлика, гидрология, гидрометрия. - М.: Высшая школа, 1987.
4. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.
5. *Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередач.* / под ред. С.С. Руднева и Л.Г. Подвидза. - М.: Машиностроение, 1984.
6. *Чугаев Р.Р.* Гидравлика (техническая механика жидкости). М.: Энергия, 1986.

Татьяна Павловна Бебенина
Светлана Ивановна Часс
Наталья Владимировна Савинова

Лабораторный практикум по гидродинамике

Корректura кафедры технической механики

Подписано в печать 15.03.2004 г.

Бумага писчая. Формат 60х84 1/16.

Печ.л. 4,4. Уч.изд. л.3,89. Тираж 350 экз. Заказ №46

Издательство УГТГА

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

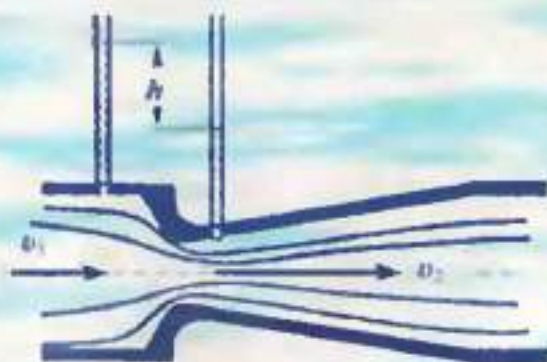
Уральская государственная горно-геологическая академия

Лаборатория множительной техники

С.И. Часс

ГИДРОМЕХАНИКА В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

Учебное пособие



Екатеринбург
2006

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский государственный горный университет»



С. И. Часс

ГИДРОМЕХАНИКА В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

*Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия*

Часс С. И.

Ч 24 Гидромеханика в примерах и задачах: Учебное пособие. –

Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2006. 216 с.

ISBN 5-8019-0119-1

В учебном пособии изложены теоретические положения, примеры гидравлических расчётов и задачи для самостоятельной работы по основным разделам курса гидромеханики (гидравлики).

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Горное дело"; "Горные машины и оборудование"; "Технологические машины и оборудование", а также может быть рекомендовано для студентов других вузов, изучающих курсы "Гидромеханика"; "Гидравлика"; "Механика жидкости и газа".

Рис. 126. Табл. 10. Библ.: 7 назв.

Рецензент: Лангева Н. Е., кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики Уральского государственного технического университета.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Уральского государственного горного университета.

ISBN 5-8019-0119-1

© Часс С. И., 2006

© Уральский государственный
горный университет, 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

Успешное изучение любого курса прикладных технических дисциплин, в том числе технической гидромеханики, или гидравлики, зависит от умения студента работать самостоятельно. Основное назначение данного учебного пособия – помочь изучающим гидромеханику применить теоретические знания и освоить методику гидравлических расчётов для решения практических и инженерных задач.

Книга включает три основных раздела курса гидромеханики: “Гидростатика”, “Гидродинамика”, “Прикладная гидромеханика”. Каждый раздел содержит несколько глав конкретной тематики. Глава начинается с теоретической части, в которой приводятся основные расчётные формулы с подробным пояснением их применения для решения примеров по данной теме.

Учебное пособие содержит разнообразные по тематике и степени сложности примеры, охватывающие основные разделы курса гидромеханики. Примеры гидравлических расчётов приближены к горному производству.

В приложении приводятся таблицы справочного характера, которые используются при решении примеров и задач. Кроме приведённых справочных таблиц можно пользоваться справочным материалом других учебников и учебных пособий.

Опыт преподавания гидромеханики показал, что студенты сравнительно легко усваивают те сведения, которые поясняются в учебнике при помощи чертежей. Именно поэтому в данном учебном пособии примеры гидравлических расчётов содержат большое количество графического материала. Задачи даются с подробными численными решениями. Некоторые приведённые примеры общеизвестны по другим учебным пособиям, но отличаются методикой решения, которой нет в других учебниках и учебных пособиях.

По каждой теме предложены задачи с ответами для самостоятельной работы. Такое изложение материала позволяет студентам проверить свои знания и способности в решении задач по гидромеханике.

ВВЕДЕНИЕ

Гидромеханика (гидравлика) – наука о механических свойствах жидкой среды, о законах равновесия и движения жидкости, взаимодействия жидкости с твёрдыми поверхностями. Гидромеханика – техническая прикладная дисциплина, выводы и законы которой предназначены для решения технических и инженерных задач.

Гидромеханика является одной из наук, составляющих фундамент инженерных знаний, и включает несколько разделов.

В разделе “Гидростатика” даётся вывод основного уравнения гидростатики, определяется давление в покоящейся жидкости, действие жидкости на плоские и криволинейные поверхности.

В разделе “Гидродинамика” рассматриваются основные законы движения жидкости, уравнение Д. Бернулли, изучаются режимы движения жидкости и потери напора в гидравлических сопротивлениях.

Раздел “Гидравлический расчёт трубопроводных систем” является основой для решения инженерных задач по расчёту простых и сложных трубопроводных систем.

В разделе “Истечение жидкости через отверстия и насадки” даётся расчёт малых и больших отверстий, истечения жидкости из насадков.

В соответствии со специализацией изучаются вопросы равномерного движения жидкости в открытых руслах, фильтрации, взаимодействия потока жидкости и твёрдого тела и другие.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖИДКОСТЯХ

Жидкость – непрерывная среда, обладающая свойством текучести и чрезвычайно малым сопротивлением деформации разрыва.

Различают капельные, газообразные и многофазные жидкости. **Капельные жидкости** (вода, масла, спирт, ртуть и т. п.), в отличие от газообразных, образуют **свободную поверхность**, т. е. поверхность, отделяющую капельную жидкость от газообразной среды. К многофазным жидкостям относятся туман, дым, илстые растворы и т. п.

Прежде чем перейти к изучению физических свойств жидкости и законов равновесия и движения жидкости, отметим, что единицы измерения в гидромеханике приняты согласно Международной системе единиц измерения (СИ). Вместе с этим, в некоторых расчётах пользуются внесистемными единицами, широко применяющимися в производственной деятельности.

Плотность и удельный вес жидкости

Плотность — это масса жидкости, заключённая в единице объёма, единица измерения кг/м^3 :

$$\rho = m/V.$$

Удельный вес — сила тяжести жидкости в единице объёма, единица измерения Н/м^3 :

$$\gamma = G/V.$$

Так как сила тяжести $G=mg$, получим пересчётную формулу между удельным весом и плотностью:

$$\gamma = \rho g.$$

Удельный вес не является справочной величиной, так как зависит от ускорения силы тяжести (g) в месте измерения, поэтому в дальнейших расчётах будем пользоваться справочной величиной плотности (ρ).

Для технических расчётов с достаточной точностью можно принимать плотность воды (в дальнейшем будем записывать без индекса) $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Для других жидкостей следует пользоваться табл. 1 (см. приложение). В этой таблице приводятся коэффициенты плотности жидкостей.

Физические свойства жидкостей

В курсе гидромеханики следует изучить по любому учебнику или курсу лекций следующие физические свойства жидкостей: *сжимаемость, капиллярность, кавитацию и вязкость*.

Обратим внимание на физическое свойство жидкости — вязкость. **Вязкость** — свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу или относительному перемещению слоёв жидкости.

В технических расчётах и при решении задач пользуются двумя коэффициентами вязкости: коэффициент динамической вязкости μ , размерность $\text{Па}\cdot\text{с}$; коэффициент кинематической вязкости ν , представляющий собой отношение динамической вязкости к плотности:

$$\nu = \mu / \rho.$$

Подставив размерности μ и ρ в расчётную формулу коэффициента кинематической вязкости, получим размерность ν в системе СИ — $\text{м}^2/\text{с}$.

Экспериментально вязкость жидкости определяется вискозиметрами. По вискозиметру определяют вязкость относительную, условную (ВУ), или так называемый градус Энглера ($^\circ E$). Для перехода от условной вязкости к коэффициенту кинематической вязкости ν пользуются эмпирической формулой Уббелюде:

$$\nu = (0,0731 \cdot ^\circ E - 0,0631 / ^\circ E) \cdot 10^{-4}.$$

Отметим, что значение коэффициентов вязкости жидкостей приводится в табл.1 (см. приложение) и будет использовано при решении задач в разделе "Гидродинамика".

Раздел первый

ГИДРОСТАТИКА

Глава 1

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ В ЖИДКОСТИ

1. Понятие гидростатического давления

В результате действия внешних сил (поверхностных и массовых) в жидкости возникают *внутренние нормальные* напряжения, называемые *гидростатическим давлением*. Таким образом, гидростатическое давление – это нормальное сила с точностью до бесконечно малых (dR), равномерно распределённая на бесконечно малой площадке (dA):

$$p = dR/dA.$$

Единица измерения давления соответствует размерности напряжения Н/м².

Примечание. В данном учебном пособии силу давления будем обозначать буквой R , чтобы не путать при написании давление p и силу P , площадь буквой A , как это принято в дисциплинах механического профиля.

1.1. Свойства гидростатического давления

Первое свойство. Давление, как нормальное напряжение, всегда направлено по внутренней нормали к площадке, величина давления является функцией только координат точки и не изменяется во времени:

$$p = f(x, y, z).$$

Второе свойство. Давление в точке жидкости действует по всем направлениям и имеет одинаковую величину.

1.2. Основное уравнение гидростатики. Абсолютное, манометрическое, вакуумметрическое давление

Для определения давления в покоящейся жидкости пользуются основным уравнением гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh. \quad (1.1)$$

Давление в любой точке покоящейся жидкости складывается из давления на поверхности жидкости (p_0) и силы тяжести столба жидкости с основанием, равным единице, и высотой, равной глубине погружения точки в жидкость (ρgh). Величина ρgh может быть названа *весовым* давлением, или *избыточным* давлением жидкости.

Поверхностное давление p_0 может быть обусловлено давлением на поверхности капиллярной жидкости газа, воздуха или твёрдого тела, например поршня.

Давление на поверхности жидкости p_0 может быть равным атмосферному давлению, больше атмосферного или недостающим до атмосферного.

Давление, рассчитанное от абсолютного нуля, т. е. с учётом атмосферного давления, называется **абсолютным**. Так, если в уравнении (1.1) давление на поверхности жидкости равно атмосферному ($p_0 = p_a$), то у давления p следует поставить индекс "абс" и считать его абсолютным давлением:

$$p_{\text{абс}} = p_a + \rho gh. \quad (1.2)$$

Если абсолютное давление больше атмосферного, то давление, **превышающее** атмосферное, называется **манометрическим**, или **избыточным** (термины равнозначны). В закрытом резервуаре при условии, что $p_{\text{абс}} > p_a$, величина манометрического давления

$$p_{\text{ман}} = p_{\text{абс}} - p_a + \rho gh$$

Манометрическое давление в открытом резервуаре на глубине h

$$p_{\text{ман}} = \rho gh. \quad (1.3)$$

Давление, **недостающее** до атмосферного, называется **вакуумметрическим**:

$$p_{\text{вак}} = p_a - p_{\text{абс}} \quad (1.4)$$

при условии, что $p_{\text{абс}} < p_a$.

При решении задач манометрическое давление учитывается со знаком "+", вакуумметрическое - со знаком "-".

Следует запомнить: чтобы записать абсолютное давление в месте установки **манометра**, нужно к атмосферному давлению **прибавить** манометрическое, т. е.

$$p_{\text{абс}} = p_a + p_{\text{ман}}$$

Чтобы записать абсолютное давление в месте установки **вакуумметра**, нужно к атмосферному давлению **прибавить** $p_{\text{вак}}$ со знаком минус, т. е.

$$p_{\text{абс}} = p_a - p_{\text{вак}}$$

В соответствии с изложенным учётом, как в дальнейших расчётах пользоваться понятиями манометрического, вакуумметрического и абсолютного давлений.

1.3. Плоскость уровня. Понятие пьезометрической высоты.

Эшоры гидростатического давления

При решении задач по определению давления в покоящейся жидкости используют условие равновесия жидкости относительно **плоскости уровня** (плоскости равного давления).

Плоскость уровня - это плоскость с постоянным гидростатическим давлением во всех точках этой плоскости. Вывод уравнения плоскости уровня

и примеры плоскости уровня приводятся в учебниках и учебных пособиях по гидромеханике (см. библиографический список).

Частным случаем плоскости уровня является *горизонтальная* плоскость в однородной покоящейся жидкости, находящейся в поле действия только сил тяжести.

Пьезометрическая высота, или пьезометрический напор, - это такая высота столба жидкости, которая своим весовым давлением (ρgh) соответствует давлению (p) в покоящейся жидкости. Характерные случаи представления пьезометрической высоты приложены в учебной литературе.

Рассмотрим один из случаев. Пусть имеем закрытый резервуар, в котором на свободной поверхности действует абсолютное давление, большее атмосферного ($p_{\text{атс}} > p_a$) (рис. 1.1, а). На глубине h выведена открытая стеклянная трубка, называемая **пьезометром**. Если бы резервуар был открыт, уровни жидкости в резервуаре и в пьезометре были бы на одном горизонте (как в сообщающихся сосудах). Поскольку давление на поверхности жидкости в резервуаре больше, чем атмосферное, уровень жидкости в пьезометре будет выше, чем в резервуаре.

Высота, на которую поднимется жидкость в пьезометре, называется **пьезометрической** высотой и обозначается h_p . Докажем, что пьезометрическая высота h_p соответствует избыточному давлению. Проведём горизонтальную **плоскость уровня** 0 - 0 на глубине h и составим условие равенства давления, рассчитанного слева по пьезометру (p_1), и давления (p_2) справа в баке на глубине h :

$$p_1 = p_2$$

Согласно основному уравнению гидростатики (1.1):

$$p_1 = p_a + \rho gh_p; \quad p_2 = p_{\text{атс}} + \rho gh;$$

$$p_a + \rho gh_p = p_{\text{атс}} + \rho gh;$$

$$h_p = \frac{p_{\text{атс}} - p_a + \rho gh}{\rho g} = \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g}. \quad (1.5)$$

Условие доказано, таким образом, избыточное давление в любой точке покоящейся жидкости можно заменить давлением столба жидкости в пьезометре. Аналогичные рассуждения можно провести по вакуумметрическому давлению.

Графическое представление величины и направления гидростатического давления, действующего на любую точку поверхности, называется **эпюрой давления**. Согласно основному уравнению гидростатики (1.1), закон распределения давления (p) по глубине (h) линейный.

На рис. 1.1 представлены эпюры абсолютного давления (б) и весового давления жидкости без учёта давления на поверхности жидкости (в).

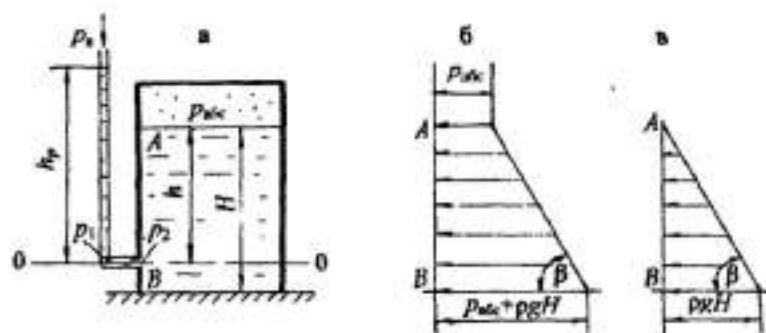


Рис. 1.1

Эпюры давления представляют соответственно равномерно распределённую нагрузку в виде трапеции для абсолютного или полного давления и в виде треугольника для весового давления. Угол наклона эпюры β зависит от величины плотности жидкости ρ . Стрелками показано, что давление в любой точке по глубине действует по внутренней нормали к поверхности AB .

1.4. Единицы измерения давления

Основной системой единиц измерения давления является система СИ. Но наряду с этой системой при технических расчётах и в производственной практике пользуются технической системой (CGS) и внесистемными единицами измерения.

Система СИ: $\text{Н/м}^2 = \text{Па}$; $10^3 \text{ Па} = \text{кПа}$; $10^6 \text{ Па} = \text{МПа}$; $\text{бар} = 10^5 \text{ Па}$.

Техническая система: $1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ ат}$; кгс/м^2 .

Внесистемные единицы измерения: мм рт. ст. ; м вод. ст. ; мм вод. ст. .

Покажем перевод единиц измерения давления:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2 = 98 \text{ кПа};$$

$$1 \text{ ат} = 735,6 \text{ мм рт. ст.}$$

$$1 \text{ ат} = 10 \text{ м вод. ст.}$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}.$$

Перевод единиц измерения давления из ат или Па в высоту столба жидкости и наоборот может быть выполнен по формулам:

$$H = p / \rho g \quad \text{и} \quad p = \rho g H.$$

Проверим приведённые выше величины. Переведём 1 ат в м вод.ст., зная, что плотность воды $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$:

$$H_{\text{ман.ст.}} = (98 \cdot 10^3) / (10^3 \cdot 9,8) = 10 \text{ м.}$$

Теперь переведём 1 ат в мм рт. ст. при плотности ртути $\rho_{\text{рт.}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$:

$$H_{\text{рт.ст.}} = (98 \cdot 10^3) / (13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8) = 0,7356 \text{ м} = 735,6 \text{ мм.}$$

В приложении (табл. 2) приведено соотношение между единицами давления.

1.5. Примеры решения задач по теме: "Гидростатическое давление в жидкости"

Задача 1.5.1. К резервуару (рис. 1.2), заполненному бензином плотностью $\rho_{\text{бенз.}} = 700 \text{ кг/м}^3$, присоединён U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{\text{рт.}} = 0,1 \text{ м}$; уровень масла над ртутью $h_{\text{м.}} = 0,2 \text{ м}$.

Определить абсолютное давление $p_{\text{абс.}}$ паров на поверхности бензина и показание пружинного манометра (см. обозначение буквой М), установленного на крышке резервуара, а также возможную высоту уровня бензина в пьезометре h_p при условии, что $h = 0,75 \text{ м}$; $a = 0,15 \text{ м}$; $H = 1,1 \text{ м}$; принять плотность ртути $\rho_{\text{рт.}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; плотность масла $\rho_{\text{мас.}} = 820 \text{ кг/м}^3$.

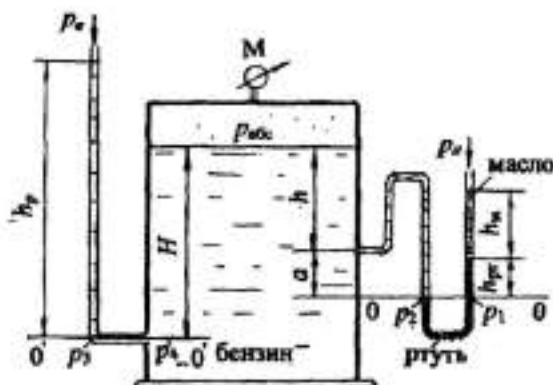


Рис. 1.2

Решение. Решение ведём с учётом атмосферного давления, так как по условию задачи требуется определять абсолютное давление паров бензина.

Для решения задачи воспользуемся понятием плоскости уровня. Выберем плоскость уровня 0-0 на разделе жидкостей бензин - ртуть и составим условие равенства давления, приравняв давления в правом (p_1) и левом коленах (p_2) U-образного манометра:

$$p_1 = p_2;$$

$$p_1 = p_a + \rho_{\text{мас}} g h_m + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}};$$

$$p_2 = p_{\text{абс}} + \rho_{\text{бен}} g (h + a).$$

Приравняем давление в правом и левом колене U-образного манометра:

$$p_a + \rho_{\text{мас}} g h_m + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} = p_{\text{абс}} + \rho_{\text{бен}} g (h + a),$$

отсюда абсолютное давление паров бензина:

$$p_{\text{абс}} = p_a + \rho_{\text{мас}} g h_m + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} - \rho_{\text{бен}} g (h + a).$$

Принимая атмосферное давление $p_a = 98 \cdot 10^3 \text{ Па} = 98 \text{ кПа}$, получим:

$$p_{\text{абс}} = 98 \cdot 10^3 + 820 \cdot 9,8 \cdot 0,2 + 13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,1 - 700 \cdot 9,8 \cdot 0,9 = 106,76 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

Показание манометра, установленного на крышке бака, можно определить так:

$$p_{\text{ман}} = p_{\text{абс}} - p_a = \rho_{\text{мас}} g h_m + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} - \rho_{\text{бен}} g (h + a) = 8,76 \text{ кПа} = 0,089 \text{ ат}.$$

Для определения возможной высоты бензина в пьезометрической трубке h_p составим условие равновесия жидкости относительно *плоскости уровня* 0-0, в этом случае расчёты можно вести по избыточному (манометрическому) давлению. Для плоскости уровня 0-0 запишем равенство давлений $p_3 = p_4$:

$$\rho_{\text{бен}} g h_p = p_{\text{ман}} + \rho_{\text{бен}} g H,$$

отсюда

$$h_p = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho_{\text{бен}} g} + H = 2,38 \text{ м}.$$

Ответ: $p_{\text{абс}} = 106,76 \cdot 10^3 \text{ Па} = 106,76 \text{ кПа}$; $p_{\text{ман}} = 8,76 \text{ кПа}$; $h_p = 2,38 \text{ м}$.

Задача 1.5.2. Два резервуара, заполненные водой и бензином, имеют центры которых находятся на одном уровне, соединены двухколенным ртутным манометром (рис. 1.3). Пространство между уровнями ртути в манометре заполнено маслом плотностью $\rho_{\text{мас}} = 900 \text{ кг/м}^3$.

Определить, в каком резервуаре давление больше и на какую величину, если высоты уровней жидкостей соответственно: $h_1 = 250 \text{ мм}$; $h_2 = 120 \text{ мм}$; $h_3 = 80 \text{ мм}$; $h_4 = 50 \text{ мм}$. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бен}} = 720 \text{ кг/м}^3$, ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Решение. Резервуары закрыты, поэтому давление будем рассчитывать по избыточному давлению без учёта атмосферного давления. Обозначим давление на уровне центра в левом резервуаре p_A , в правом - p_B .

Покажем положение *плоскостей уровня* для данной равновесной системы: это плоскости 0-0; 0'-0' и 0''-0''. Эти горизонтальные плоскости проводятся по однородной жидкости: плоскость 0-0 по маслу, две другие по ртути. Для этих плоскостей запишем условие равенства давлений: $p_1 = p_2$;

$p_1 = p_4$; $p_3 = p_6$. Плоскость 0-0 является основной плоскостью равновесного состояния, для которой $p_1 = p_2$.

Согласно основному уравнению гидростатики (1.1), чтобы записать давление p_1 , нужно к давлению в центре резервуара А (p_A) прибавить давление столба воды $\rho_{\text{вод}}gh_1$ - получим давление $p_3 = p_4$, из давления p_4 вычтем (поднимаемся вверх) давление столба ртути $\rho_{\text{рт}}gh_2$ и, таким образом, получим давление p_1 :

$$p_1 = p_A + \rho_{\text{вод}}gh_1 - \rho_{\text{рт}}gh_2$$

Аналогично запишем давление p_2 : к давлению в центре резервуара В (p_B) прибавим давление столба бензина $\rho_{\text{бен}}gh_5$ и давление столба ртути $\rho_{\text{рт}}gh_4$ - получим давление $p_6 = p_3$. Затем от плоскости 0'-0' поднимемся вверх до плоскости 0-0, т. е. вычтем давление столба масла $\rho_{\text{мас}}gh_3$ и получим давление p_2 :

$$p_2 = p_B + \rho_{\text{бен}}gh_5 + \rho_{\text{рт}}gh_4 - \rho_{\text{мас}}gh_3$$

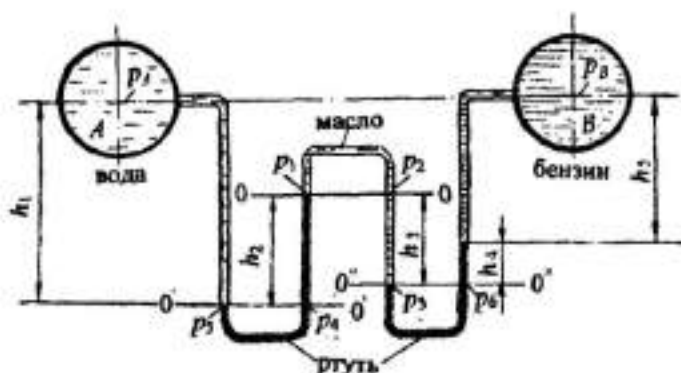


Рис. 1.3

Согласно чертежу, высота столба бензина $h_5 = h_1 - h_2 + h_3 - h_4 = 160$ мм.

По распределению уровня ртути в дифференциальном манометре предполагаем, что давление в резервуаре А больше, чем давление в резервуаре В. Находим эту разность:

$$\Delta p = p_A - p_B = \rho_{\text{бен}}gh_5 - \rho_{\text{рт}}gh_4 - \rho_{\text{мас}}gh_3 - \rho_{\text{вод}}gh_1 + \rho_{\text{рт}}gh_2$$

При подстановке численных значений следует перевести высоты уровней жидкости в м.

Ответ: $\Delta p = p_A - p_B = 20,63$ кПа.

Ответ получился положительным, значит, предположение, что давление в резервуаре А больше, верно.

Задача 1.5.3. Определить, какое давление - манометрическое или вакуум, показывает мановакуумметр ($p_{\text{мв}}$), установленный по оси резервуара B с керосином, если показание манометра по центру резервуара A с водой $p_{\text{ман}} = 0,12$ ат. Между резервуарами подключён U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{\text{рт}} = 200$ мм; расстояние от уровня ртути в левом колене до оси резервуара A $h = 300$ мм. Оси центров резервуаров находятся на одной линии (рис. 1.4).

Принять плотность керосина $\rho_{\text{кер}} = 820 \text{ кг/м}^3$; ртути - $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Примечание. Мановакуумметр - это прибор для измерения как манометрического, так и вакуумметрического давления, имеющий шкалу измерения со знаком "+" (манометрическое давление) и со знаком "-" (вакуумметрическое давление).

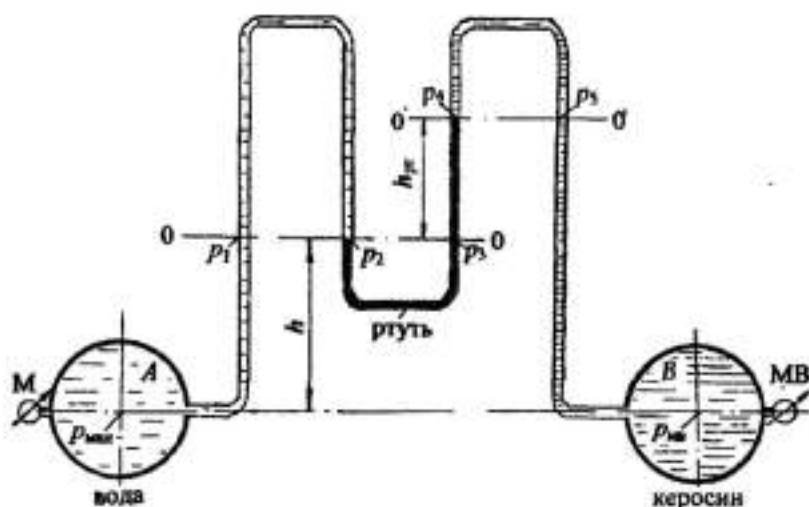


Рис. 1.4

Решение. В задачах 1.5.1 и 1.5.2 подробно изложена методика определения давления путём составления условия равенства давления относительно плоскости уровня. Из этих решений следует сделать *выводы*.

Во-первых, по плоскости уровня можно перейти в любую точку жидкости, и давление останется той же величины.

Во-вторых, при расчёте весового давления жидкости (ρgh) в случае *увеличения глубины* (отсчёты вниз) давление увеличивается и учитывается со знаком "+", в случае *уменьшения глубины* (поднимаемся вверх) давление уменьшается и учитывается со знаком "-".

В данной задаче (см. рис. 1.4) основной плоскостью уровня для всей системы является плоскость 0-0, в левой части она проходит по воде, в правой - по ртути U-образного манометра. Для этой плоскости $p_1 = p_2 = p_3$. В другой плоскости 0'-0', проведённой в керосине, $p_4 = p_5$. Задачу будем решать без учёта атмосферного давления. Значит, если рассчитанное давление на уровне установки мановакуумметра (МВ) получится положительным, прибор работает как манометр, если давление получится отрицательным, т. е. вакуумметрическим, прибор работает как вакуумметр.

А теперь запишем давление на уровне установки мановакуумметра путем следующих рассуждений. Имеем манометрическое давление $p_{\text{ман}}$ по оси резервуара А, *поднимаемся* до плоскости уровня 0-0, значит, *вычитаем* давление столба воды $\rho g h$, получаем давление p_1 , по плоскости уровня переходим в левое колено U-образного манометра, где $p_1 = p_2$. Затем переходим в правое колено манометра, где $p_3 = p_2$, *поднимаемся* к плоскости 0'-0', значит, *вычитаем* давление столба ртути $\rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}}$, получаем давление p_4 ; переходим по плоскости уровня 0'-0' к давлению $p_5 = p_4$. И последний этап: к полученному давлению p_5 *прибавляем* давление столба керосина $\rho_{\text{кер}} g (h + h_{\text{рт}})$, поскольку *опускаемся вниз* до оси резервуара В.

Таким образом, записали давление по оси резервуара с керосином, где установлен *мановакуумметр*.

Представленные рассуждения запишем следующим образом:

$$p_{\text{ман}} - \rho g h - \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} + \rho_{\text{кер}} g (h + h_{\text{рт}}) = p_{\text{атм}}$$

Подставим численные значения:

$$p_{\text{ман}} = 0,12 \cdot 98 \cdot 10^3 - 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,3 - 13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,2 + 820 \cdot 9,8 \cdot 0,5 = 9,8 \cdot 10^3 \cdot (1,2 - 0,3 - 2,72 + 0,41) = -1,41 \cdot 9,8 \cdot 10^3 \text{ Па} = -13,82 \text{ кПа}.$$

Знак “-” свидетельствует о том, что *мановакуумметр* работает как *вакуумметр*. Показание вакуумметра $p_{\text{ман}} = 13,82 \text{ кПа} = 0,14 \text{ ат}$ (в такой записи индекс *ван* заменяет знак “-”).

Ответ: мановакуумметр работает как вакуумметр и показывает вакуумметрическое давление $p_{\text{ман}} = 0,14 \text{ ат}$.

В разделе 1.6 приведены задачи для самостоятельной работы по усвоению знаний определения давления в покоящейся жидкости.

1.6. Задачи для самостоятельной работы по теме:
"Гидростатическое давление в жидкости"

Задача 1.6.1

Определить, каким прибором следует измерять давление в баке, заполненном маслом, и показание этого прибора (в ат), установленного на глубине $h = 1,2$ м, если показание U -образного ртутного манометра, установленного на поверхности масла, $h_{рт} = 200$ мм. Принять плотность масла $\rho_{мас} = 900 \text{ кг/м}^3$ (рис. 1.5).

Ответ: следует пользоваться вакуумметром, $p_{проб} = p_{вак} = 0,163$ ат.

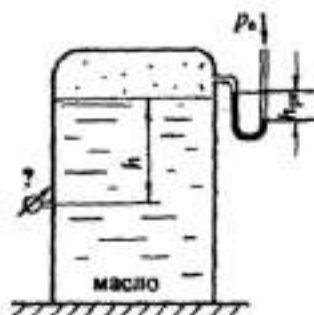


Рис. 1.5

Задача 1.6.2

Определить показание U -образного ртутного манометра ($h_{рт}$), подключённого к резервуару с маслом на глубине $h = 0,8$ м, если показание пружинного манометра, установленного на глубине $h_1 = 1,2$ м, $p_{ман} = 0,15$ ат. Принять поправку ртутного манометра $a = 0,3$ м, плотность масла $\rho_{мас} = 900 \text{ кг/м}^3$, плотность ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (рис. 1.6).

Ответ: $h_{рт} = 104$ мм.

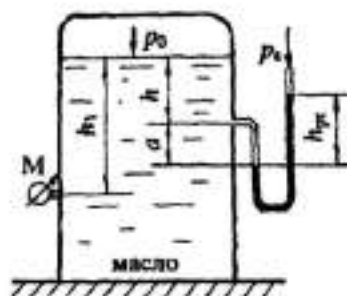


Рис. 1.6

Задача 1.6.3

Определить давление (p_0) на поверхности бензина в закрытом резервуаре и показание мановакуумметра ($p_{\text{мв}}$), установленного на глубине $h = 1,5$ м, если показание U-образного ртутного манометра $h_{\text{рт}} = 400$ мм. Принять глубину $h_1 = 1,0$ м, плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720 \text{ кг/м}^3$ (рис. 1.7).

Ответ: $p_0 = p_{\text{мв}} = 60,4 \text{ кПа}$; $p_{\text{мв}} - p_{\text{атм}} = 49,8 \text{ кПа}$.

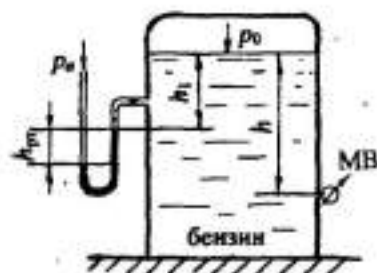


Рис. 1.7

Задача 1.6.4

Определить абсолютное давление на поверхности бензина в закрытом резервуаре ($p_{\text{абс}}$), а также показание мановакуумметра ($p_{\text{мв}}$ в бар), установленного на глубине $h_1 = 1,6$ м при заданных величинах $h = 0,5$ м, $h_{\text{рт}} = 300$ мм, атмосферное давление $p_{\text{а}} = 740$ мм рт. ст. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720 \text{ кг/м}^3$; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Давлением воздуха в U-образном ртутном манометре можно пренебречь (рис. 1.8).

Ответ: $p_{\text{абс}} = 55,13 \text{ кПа}$; $p_{\text{мв}} - p_{\text{атм}} = 0,32 \text{ бар}$.

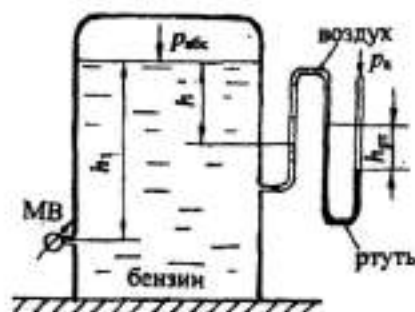


Рис. 1.8

Задача 1.6.5

Определить, каким прибором (манометром или вакуумметром) следует измерить давление газа в баллоне по показанию (h) двухжидкостного чашечного манометра, заполненного водой и ртутью ($\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), если $H = 0,6 \text{ м}$; $h = 100 \text{ мм}$; $\Delta h = 40 \text{ мм}$. Показание прибора представить в ат (рис. 1.9).

Ответ: следует пользоваться вакуумметром, $p_{\text{вак}} = p_{\text{ман}} = 0,13 \text{ ат}$.

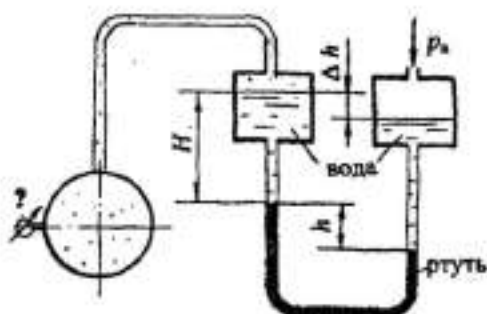


Рис. 1.9

Задача 1.6.6

Определить абсолютное давление воздуха в резервуаре В, если показание манометра, установленного по центру резервуара А, заполненного маслом, $p_{\text{ман}} = 0,12 \text{ ат}$, высоты уровней масла и ртути в U-образном ртутном дифференциальном манометре $h_m = 600 \text{ мм}$; $h_{рт} = 200 \text{ мм}$ (рис. 1.10).

Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900 \text{ кг/м}^3$; ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Ответ: $p_{\text{абс}} = 88,4 \text{ кПа}$.

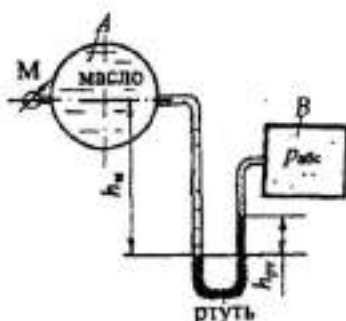


Рис. 1.10

Задача 1.6.7

Определить разность давлений (в ат) в центрах трубопроводов A и B , заполненных водой и маслом, если высоты уровней воды и масла в U -образном ртутном дифференциальном манометре: $h_a = 500$ мм; $h_b = 400$ мм (рис. 1.11).

Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Ответ: $\Delta p = p_A - p_B = 0,122$ ат.

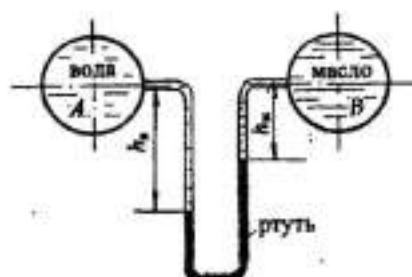


Рис. 1.11

Задача 1.6.8

Два сосуда наполнены разнородными жидкостями: маслом и керосином. На поверхности жидкостей в сосудах действуют давления p_1 и p_2 .

Найти разность этих давлений, если показание U -образного ртутного манометра $h = 100$ мм, высота уровня масла $H = 500$ мм, превышение уровня керосина $\Delta h = 40$ мм. Принять плотности жидкостей: масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³; керосина $\rho_{\text{кер}} = 800$ кг/м³; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³ (рис. 1.12).

Ответ: $\Delta p = p_1 - p_2 = 0,126$ ат.

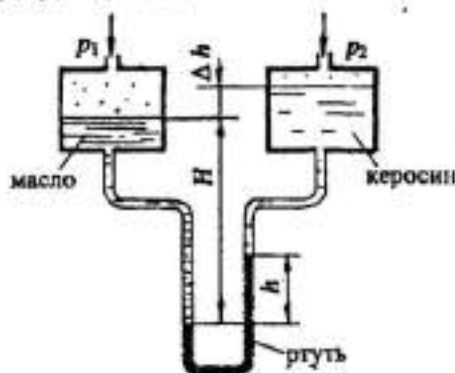


Рис. 1.12

Задача 1.6.9

Из открытого резервуара C через трубу B вода поднята в резервуар A с глубиной заполнения $h = 0,5$ м. Давление воздуха на поверхности воды в резервуаре A измерено U -образным ртутным манометром, показание которого $h_{рт} = 200$ мм (рис. 1.13). Определить высоту воды H в трубе B . Принять плотность ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Ответ: $H = 2,22$ м.

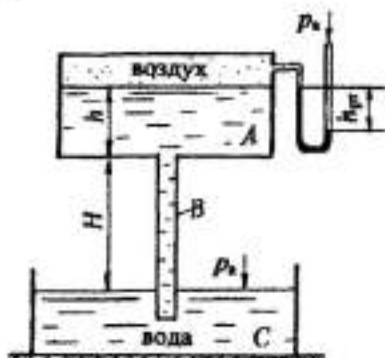


Рис. 1.13

Задача 1.6.10

Определить избыточное давление p_x (в бар) в центре сосуда с бензином, если показание манометра, включённого на уровне центра сосуда с водой $p_{ман} = 0,12$ ат, высоты уровней жидкостей: $h_1 = 400$ мм; $h_2 = 200$ мм.

Центры резервуаров находятся на одном уровне. Принять плотность бензина $\rho_{бен} = 720$ кг/м³; ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³ (рис. 1.14).

Ответ: $p_x = p_{ман} = 0,354$ бар.

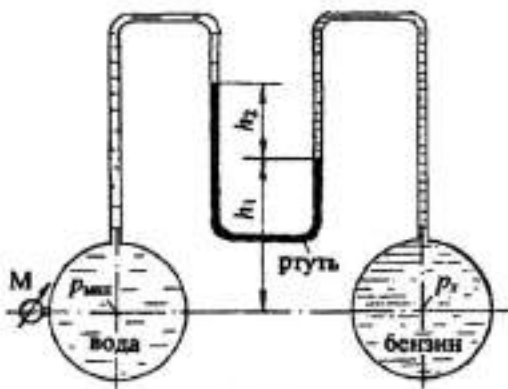


Рис. 1.14

Задача 1.6.11

Определить показание манометра $p_{\text{ман}}$ (в ат), установленного на маслопроводе диаметром $d = 200$ мм, если абсолютное давление в воздушном резервуаре $p_{\text{вс}} = 0,9$ ат. Между воздушным резервуаром и маслопроводом подключён U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{\text{рт}} = 200$ мм. Высота столба масла от оси маслопровода до уровня ртути в U-образном манометре $h_{\text{м}} = 600$ мм. Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³ (рис. 1.15).

Ответ: $p_{\text{ман}} = 0,11$ ат.

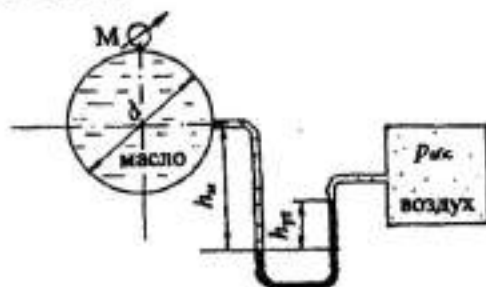


Рис. 1.15

Задача 1.6.12

В закрытом резервуаре A , заполненном маслом, давление на поверхности жидкости p_0 . На глубине $h = 0,6$ м подключён U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{\text{рт}} = 40$ мм, понижение уровня ртути в правом колене $a = 0,2$ м. Определить давление p_0 (в бар) на поверхности масла, а также высоту подъёма воды ($h_в$) в стеклянной трубке, опущенной в открытый резервуар B , заполненный водой (рис. 1.16).

Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Ответ: $p_0 = p_{\text{мас}} = 0,124$ бар; $h_в = 1,264$ м.

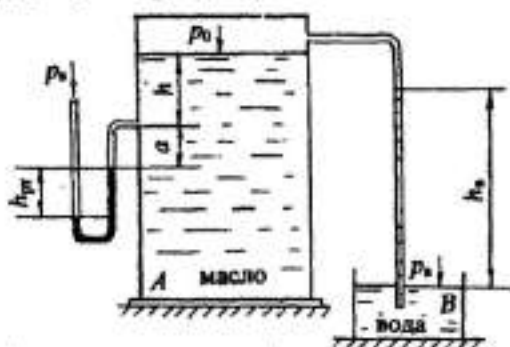


Рис. 1.16

Задача 1.6.13

Определить, на какой высоте Z находится уровень ртути в левом колене U -образного ртутного манометра, если при манометрическом давлении по центру маслопровода $p_{\text{ман}} = 0,24$ бар и показания ртутного манометра $h_{\text{рт}} = 110$ мм система находится в равновесии. Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³, плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³ (рис. 1.17).

Ответ: $Z = 1,06$ м.

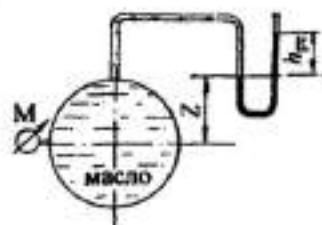


Рис. 1.17

Задача 1.6.14

Два резервуара A и B , линии центров которых совпадают, соединены двухколенным ртутным манометром. Определить, каким прибором следует измерять давление воздуха p_x в резервуаре B , если давление на поверхности воды в резервуаре A $p_{\text{ман}} = 0,18$ ат, а разности уровней ртути в дифференциальном манометре: $h_1 = 100$ мм; $h_2 = 120$ мм. Уровень ртути в левом колене расположен ниже уровня воды в резервуаре A на величину $h = 0,5$ м. Пространство между уровнями ртути в манометре заполнено маслом плотностью $\rho_{\text{мас}} = 880$ кг/м³. Принять плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³. Плотностью воздуха при расчётах можно пренебречь (рис. 1.18).

Ответ: давление измеряется вакуумметром: $p_x = p_{\text{ман}} = 5,9$ кПа = 0,06 ат.

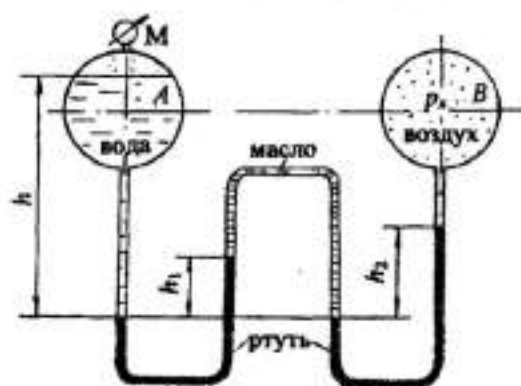


Рис. 1.18

СИЛА ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

В практике гидравлических расчётов часто приходится определять величину и точку приложения силы давления жидкости на плоские стенки различной конфигурации. Такими плоскими стенками, воспринимающими давление жидкости, являются стенки резервуаров, плоские затворы, крышки, грани плотин, элементы гидротехнических сооружений и др.

Для определения силы давления жидкости на плоские стенки пользуются двумя методами - *аналитическим и графо-аналитическим*. Аналитический метод применим для плоских стенок любой формы, графо-аналитический - только для прямоугольных стенок.

2.1. Аналитический метод определения силы давления жидкости

Для расчёта силы полного или абсолютного давления жидкости на плоскую поверхность пользуются аналитической расчётной зависимостью:

$$R_{\text{полн}} = p_C A. \quad (2.1)$$

Сила полного давления жидкости на плоскую стенку равна произведению площади стенки (A) на полное давление на глубине погружения центра тяжести стенки в жидкость (p_C).

Согласно *основному уравнению гидростатики* (1.1), давление на глубине погружения центра тяжести стенки (p_C)

$$p_C = p_0 + \rho g h_C, \quad (2.2)$$

где h_C - глубина погружения центра тяжести стенки в жидкость, отсчитанная от *свободной* поверхности;

ρ - плотность жидкости;

g - ускорение свободного падения.

В формуле (2.2) давление на поверхности жидкости (p_0) может быть атмосферным, манометрическим (избыточным), вакуумметрическим. Формулу (2.1) с учётом формулы (2.2) можно записать:

$$R_{\text{полн}} = p_0 A + \rho g h_C A. \quad (2.3)$$

Таким образом, сила полного давления может быть представлена в виде двух составляющих:

сила *внешнего, или поверхностного*, давления

$$R_0 = p_0 A; \quad (2.4)$$

сила *весового* давления жидкости

$$R_{\text{ж}} = \rho g h_C A. \quad (2.5)$$

Сила полного давления $R_{\text{полн}}$ находится как геометрическая сумма двух параллельных сил R_0 и R_{Σ} :

$$\vec{R}_{\text{полн}} = \vec{R}_0 + \vec{R}_{\Sigma}.$$

Давление на поверхности жидкости, согласно закону Паскаля, передаётся внутрь жидкости всем точкам без изменения. Это значит, что эпюра внешнего давления (p_0) представляет равномерно распределённую прямоугольную нагрузку, а равнодействующая такой нагрузки (R_0) *приложена в центре тяжести поверхности стенки*, т. е. на глубине h_C .

Составляющая от весового давления жидкости R_{Σ} приложена в точке, называемой *центром давления*.

Центр давления силы R_{Σ} всегда располагается ниже центра тяжести стенки. Глубина погружения центра давления (h_D) рассчитывается по формуле

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A}, \quad (2.6)$$

где $\frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A} = e$ — эксцентриситет центра давления, его величина соответствует смещению центра давления относительно центра тяжести;

I_C — центральный момент инерции плоской стенки относительно *горизонтальной* оси;

α — угол наклона плоской стенки к горизонту.

В приложении (табл. 3) для некоторых плоских симметричных фигур приведены формулы для *определения центральных моментов инерции относительно горизонтальной оси, площадей и координат их центров тяжести*.

Для определения точки приложения силы полного давления $R_{\text{полн}}$ нужно воспользоваться *теоремой о моменте равнодействующей*: момент равнодействующей относительно какой-либо оси равен сумме моментов её составляющих относительно той же оси. Применение этой теоремы будет рассмотрено далее при разборе решения задачи 2.3.2.

2.2. Графо-аналитический метод расчёта силы давления и центра давления на прямоугольные поверхности

Графо-аналитический метод расчёта силы давления основан на построении эпюр гидростатического давления. Эпюры давления представляют собой равномерно распределённую нагрузку по ширине (или длине) плоской прямоугольной поверхности. Для поверхностей в виде круга, эллипса, треугольника и им подобных эпюра давления в объёмном представлении является довольно сложной фигурой, так как изменение давления следует учитывать при переменной глубине по всей плоской поверхности. Для таких поверхностей графо-аналитический метод не применяется.

Определим силу давления жидкости на прямоугольную стенку AB высотой H и длиной (l) , перпендикулярной плоскости чертежа. Удерживаемый напор равен высоте стенки (рис. 2.1). Совместим прямоугольную стенку с плоскостью чертежа и покажем положение центра тяжести стенки точку - C .

Рассчитаем силу давления жидкости R_x *аналитически и графически*.

Аналитический метод расчёта. Согласно формуле (2.5), сила давления жидкости

$$R_x = \rho g h_c A = \frac{\rho g H^2}{2} l, \quad (2.7)$$

где $h_c = H/2$; $A = H l$.

Положение центра давления рассчитываем по формуле (2.6)

$$h_D = h_c + \frac{I_c \sin^2 \alpha}{h_c A},$$

где $I_c = \frac{H^3}{12}$ – центральный момент инерции относительно горизонтальной оси для прямоугольника (см. приложение табл. 3); $\alpha = 90^\circ$; $\sin \alpha = 1,0$.

Таким образом,
$$h_D = \frac{H}{2} + \frac{H^3}{12 H^2 l} = \frac{H}{2} + \frac{H}{6} = \frac{2}{3} H. \quad (2.8)$$

А теперь перейдём к *графо-аналитическому* методу расчёта силы давления и центра давления. Построим эпюру гидростатического давления. Давление жидкости в точке A $p_A = 0$, в точке B - $p_B = \rho g H$.

Эпюра давления в плоскости чертежа представляет равномерную нагрузку в виде треугольника, в объёмном представлении – это треугольная призма. Равнодействующая такой равномерной нагрузки равна объёму треугольной призмы и проходит через центр тяжести этой призмы, т. е. через центр тяжести эпюры гидростатического давления.

Проверим:

$$R_x = V_{\text{эпюры}} = S_{\text{эпюры}} l = \frac{\rho g H^2}{2} l, \quad (2.9)$$

где $S_{\text{эпюры}}$ – площадь эпюры давления в виде треугольника.

Центр тяжести эпюры располагается на расстоянии $2/3 H$ (центр тяжести треугольника):

$$h_{\text{ц.т.эп.}} = 2/3 H. \quad (2.10)$$

Сравнивая формулы (2.7) и (2.9), а также (2.8) и (2.10), приходим к выводу: *графо-аналитически сила давления жидкости на прямоугольные поверхности равна произведению площади эпюры гидростатического давления на длину (или ширину) плоской стенки и проходит через центр тяжести эпюры давления:*

$$R_x = S_{\pi} l; \quad h_D = h_{\text{ц.т.эп.}} \quad (2.11)$$

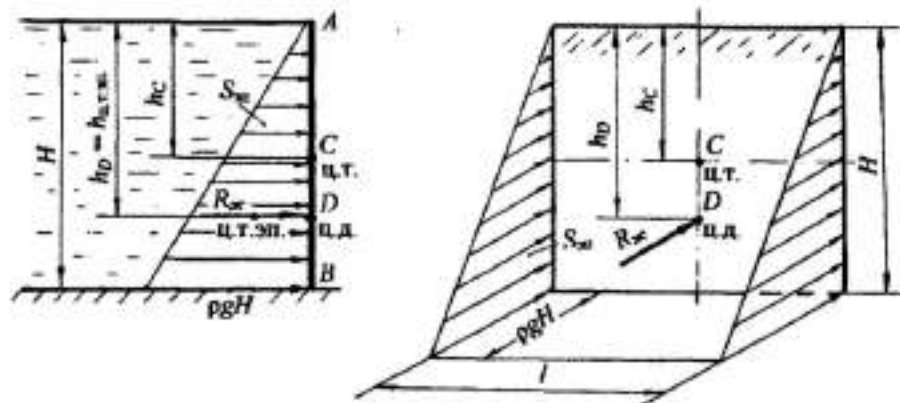


Рис. 2.1

Используя выше изложенные теоретические положения, рассмотрим примеры определения силы давления на плоские поверхности.

2.3. Примеры решения задач по теме:

“Расчёт силы давления жидкости на плоские поверхности”

Задача 2.3.1. Прямоугольная крышка AB (рис. 2.2), расположенная под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту, перекрывает патрубок закрытого резервуара с водой. Высота патрубка $h = 600$ мм, ширина $b = 400$ мм. Крышка может поворачиваться вокруг шарнира A . Высота уровня воды над шарниром $a = 200$ мм. Давление на поверхности воды соответствует показанию U -образного ртутного манометра $h_m = 80$ мм.

Определить силу натяжения троса T для удержания крышки AB в закрытом положении. Угол натяжения троса $\beta = 45^\circ$. Принять плотность воды $\rho = 10^3$ кг/м³.

Решение. Чтобы определить силу натяжения троса T для удержания крышки AB в закрытом положении, нужно определить силу от внешнего давления R_0 и силу давления воды R_x .

Рассмотрим *аналитический способ* расчёта силы давления и центра давления.

Методика расчёта силы давления включает следующую последовательность:

- рассчитывается сила давления жидкости и сила от внешнего давления, при этом на чертеже обозначаются центральные оси плоской стенки и глубина погружения центра тяжести стенки от свободной поверхности (h_C);
- определяются точки приложения сил, на чертеже обозначается точка приложения силы давления жидкости, т. е. центр давления, и глубина погружения центра давления h_D ;
- показывается направление действия сил. Следует помнить, что сила давления всегда направлена *по нормали* к поверхности.

1. Определим *силу от внешнего давления* R_0 . Значение давления p_0 по показанию U-образного манометра получим из условия равновесия жидкости относительно плоскости уровня 0-0. Давление p_0 является избыточным:

$$p_0 = \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}}; \quad p_0 = 13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,08 = 10,66 \cdot 10^3 \text{ Па} \quad 10,7 \text{ кПа.}$$

Значение p_0 можно получить другим способом, а именно перевести показание манометра 80 мм рт. ст. в Па:

$$p_0 = 80 \cdot 133,3 = 10,66 \cdot 10^3 \text{ Па} = 10,7 \text{ кПа.}$$

Сила от внешнего давления, согласно формуле (2.4), $R_0 = p_0 A$, где A – площадь крышки, м^2 .

Для наглядности крышку совместим с плоскостью чертежа, тогда ширина крышки равна b , а высота $h/\sin \alpha = h/\sin 60^\circ = 0,693 \text{ м}$.

Площадь крышки $A = b h / \sin 60^\circ$.

Сила от внешнего давления

$$R_0 = 10,7 \cdot 0,4 \cdot 0,693 = 2,97 \text{ кН.}$$

Покажем *линию действия и точку приложения* силы R_0 . Согласно пояснениям в разделе 2.1, эпюры давления p_0 представляют равномерно распределённую прямоугольную нагрузку, равнодействующая от такой нагрузки (R_0) *проходит* через центр тяжести эпюры и *приложена* в центре тяжести стенки на глубине h_C (рис. 2.2,б). Сила R_0 направлена *по нормали* из жидкости на стенку, как сила внешнего, *избыточного* давления.

2. Определим *силу давления жидкости* R_x согласно формуле (2.5):

$$R_x = \rho g h_C A,$$

где $h_C = (a + h/2) = 0,5 \text{ м}$; глубину погружения центра тяжести стенки в жидкость h_C отсчитываем от *свободной* поверхности (см. рис. 2.2, а).

Подставим значения:

$$R_x = \rho g (a + h/2) h b / \sin \alpha;$$

$$R_x = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,5 \cdot 0,693 \cdot 0,4 = 1,36 \cdot 10^3 \text{ Н} = 1,36 \text{ кН.}$$

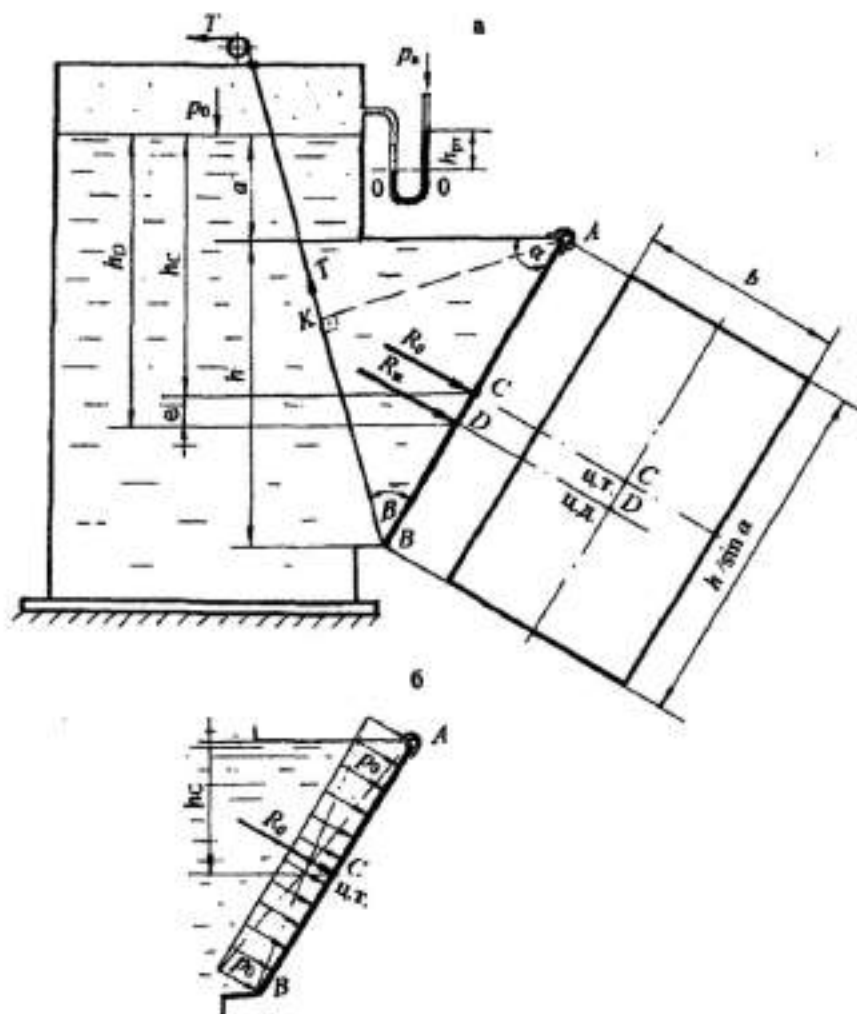


Рис. 2.2

Чтобы показать геометрическое положение силы давления жидкости R_D , рассчитаем глубину погружения центра давления h_D , т.е. точки приложения силы R_D по формуле (2.6):

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A},$$

где $I_C = \frac{bh^3}{12\sin^3\alpha}$ – центральный момент инерции прямоугольной крышки относительно горизонтальной оси (т. е. проходящей через центр тяжести крышки).

Подставив все параметры в буквенном выражении, чтобы сделать возможные сокращения, получим глубину погружения центра давления h_D :

$$h_D = h_C + h^2/12h_C = 0,5 + 0,06 = 0,56 \text{ м.}$$

Эксцентриситет $e = h^2/12h_C$, т. е. понижение центра давления относительно центра тяжести $e = 0,06 \text{ м} = 60 \text{ мм}$.

Покажем на чертеже (рис. 2.2,а) h_D и e . Сила давления жидкости R_x приложена в центре давления (точка D) *по нормали* из жидкости на крышку.

3. Рассчитаем *силу натяжения троса T* . При решении этой задачи можно не находить равнодействующую сил давления. Составим уравнение механики: сумма моментов сил относительно шарнира A равна нулю: $\Sigma M_A = 0$. От каждой силы R_0 , R_x и T берётся момент относительно точки A :

$$R_0 \cdot AC + R_x \cdot AD - T \cdot AK = 0;$$

$$\frac{R_0 h}{2 \sin 60^\circ} + \frac{R_x (h_D - a)}{\sin 60^\circ} - \frac{Th \sin 45^\circ}{\sin 60^\circ} = 0.$$

После сокращения на $\sin 60^\circ$ и преобразований получим $T = 3,25 \text{ кН}$.

Ответ: для удержания крышки AB в закрытом положении необходима сила натяжения троса $T \geq 3,25 \text{ кН}$.

Рассмотрим другой вариант в условии задачи 2.3.1, когда показание U -образного манометра будет представлено так, что уровень ртути в левом колене U -образного манометра будет выше на величину $h_{рт}$ (рис. 2.3).

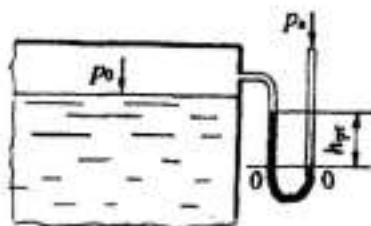


Рис. 2.3

Из условия равенства давления относительно плоскости уровня 0-0 (см. рис. 2.3) запишем:

$$p_{0abc} = \rho_{\text{ж}} g h_{\text{ст}} = p_A \text{ или } p_A - p_{0abc} = \rho_{\text{ж}} g h_{\text{ст}};$$

$$p_A - p_{0abc} = p_{\text{вак}}, \text{ значит, } p_{\text{вак}} = \rho_{\text{ж}} g h_{\text{ст}}.$$

На поверхности воды действует вакуумметрическое давление. Это значит, что сила от *внешнего вакуумметрического давления* будет приложена в центре тяжести стенки, но направлена по нормали *внутрь* жидкости (рис. 2.4).

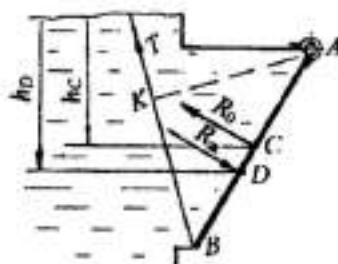


Рис. 2.4

В уравнении моментов сил относительно точки A момент от силы R_0 нужно учитывать со знаком минус, как и момент от силы T:

$$R_{\text{ж}} \cdot AD - R_0 \cdot AC - T \cdot AK = 0.$$

Возможно, получится такой случай, когда не потребуется трос, а момент от силы давления жидкости будет равен или меньше момента от внешней вакуумметрической силы. Под действием вакуумметрического давления на поверхности воды крышка будет в закрытом положении:

$$R_{\text{ж}} \cdot AD = R_0 \cdot AC.$$

Можно рассчитать предельный вакуум для удержания крышки в закрытом положении. Из приведённого равенства следует: $R_0 = 1,632 \text{ кН}$.

Зная, что $R_0 = p_{\text{вак}} A$, определим $p_{\text{вак}}$:

$$p_{\text{вак}} = R_0/A; \quad A = bh/\sin 60^\circ = 0,2772 \text{ м}^2; \quad \text{тогда } p_{\text{вак}} = 5,89 \text{ кПа}.$$

Рассчитаем высоту столба ртути $h_{рт}$ в U-образном манометре (см. рис. 2.3), при котором крышка будет в закрытом положении под действием вакуума на поверхности воды:

$$p_{\text{вак}} = \rho_{рт} g h_{рт} \text{ отсюда } h_{рт} = 0,044 \text{ м} = 44 \text{ мм.}$$

Задача 2.3.2. В торцевой стенке цистерны, заполненной бензином, предусмотрена плоская круглая крышка диаметром $d = 1,6$ м, укрепленная при помощи болтов. Определить силу давления бензина на крышку и точку приложения силы, если высота уровня бензина над нижней кромкой крышки $H = 2,0$ м. На поверхности бензина действует вакуумметрическое давление $p_{\text{вак}} = 0,2$ ат.

Принять плотность бензина $\rho_{\text{бен}} = 720 \text{ кг/м}^3$ (рис. 2.5).

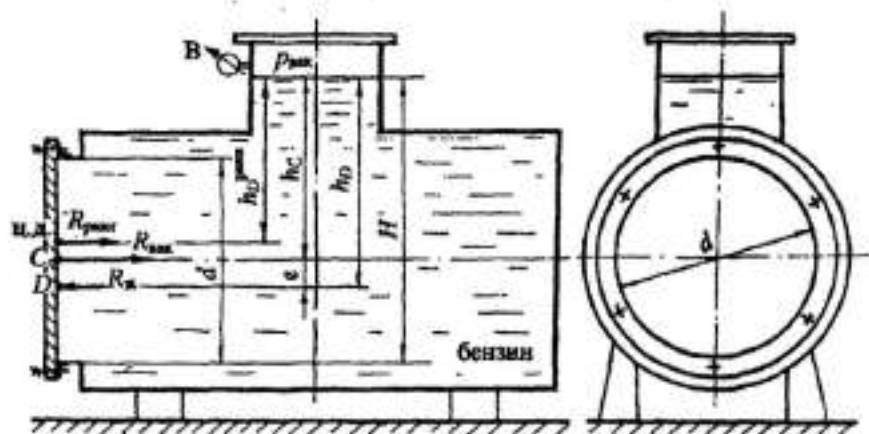


Рис. 2.5

Решение. Для определения *равнодействующей давления* воспользуемся аналитическим методом. Согласно формуле (2.3), равнодействующая, или сила полного давления:

$$R_{\text{полн}} = p_0 A + \rho g h_C A \text{ или } \vec{R}_{\text{полн}} = \vec{R}_0 + \vec{R}_ж.$$

1. Определим силу от внешнего, *вакуумметрического* давления:

$$R_0 = R_{\text{вак}} = p_{\text{вак}} A,$$

где A – площадь крышки; $A = \pi d^2/4 = 3,14 \cdot 1,6^2/4 = 2,0 \text{ м}^2$.

$$R_{\text{вак}} = 0,2 \cdot 98 \cdot 10^3 \cdot 2,0 = 39,4 \cdot 10^3 \text{ Н} = 39,4 \text{ кН.}$$

Показываем линию действия $R_{ж}$. Эта сила приложена в центре тяжести крышки (т. С) и направлена *по нормали внутрь* жидкости, как сила отрицательного, вакуумметрического давления.

2. Рассчитаем силу давления *бензина* на круглую крышку по формуле (2.5)

$$R_{ж} = \rho_{бен} g h_C A,$$

где h_C – глубина погружения центра тяжести крышки в жидкость, отсчитанная от свободной поверхности. Определяем h_C по чертежу (см. рис. 2.5): $h_C = H - d/2 = 1,2$ м.

$$R_{ж} = 720 \cdot 9,8 \cdot 1,2 \cdot 2,0 = 16,9 \cdot 10^3 \text{ Н} = 16,9 \text{ кН}.$$

Показываем линию действия силы давления бензина. Сила давления жидкости ($R_{ж}$) приложена *в центре давления* на глубине h_D и направлена по нормали из жидкости. По формуле (2.6) глубина погружения центра давления

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A},$$

где $\alpha = 90^\circ$; $\sin \alpha = 1,0$ для вертикальной крышки;

I_C – центральный момент инерции круглой крышки относительно горизонтальной оси: $I_C = \frac{\pi d^4}{64}$ (см. приложение, табл. 3).

После подстановки данных в буквенное выражение h_D получим:

$$h_D = h_C + \frac{d^2}{16 h_C}; \quad h_D = 1,2 + 0,13 = 1,33 \text{ м}.$$

Эксцентриситет $e = 0,13$ м.

Покажем на чертеже h_D и e .

3. Определим величину и положение *равнодействующей* $R_{реш}$ (или силы полного давления) путём векторного сложения сил R_0 и $R_{ж}$:

$$\vec{R}_{реш} = \vec{R}_0 + \vec{R}_{ж};$$

$$R_{реш} = R_0 - R_{ж} = 22,5 \text{ кН}.$$

Положение равнодействующей можно определить, пользуясь теоремой Вариньона: момент от равнодействующей равен сумме моментов составляющих.

Составим сумму моментов сил относительно оси, проходящей по свободной поверхности бензина. Введём обозначение: пусть $h_D^{реш}$ – глубина погружения центра давления для равнодействующей, тогда

$$M_{R_{реш}} = M_{R_0} + M_{R_{ж}};$$

$$R_{\text{равн}} h_D^{\text{равн}} = R_C h_C - R_{\text{ж}} h_D$$

отсюда

$$h_D^{\text{равн}} = (R_C h_C - R_{\text{ж}} h_D) / R_{\text{равн}}$$

После подстановки численных значений $h_D^{\text{равн}} = 1,1$ м. Покижем на чертеже $h_D^{\text{равн}}$, центр давления для равнодействующей и линию действия равнодействующей $R_{\text{равн}}$ по нормали внутрь жидкости.

Ответ: $R_{\text{равн}} = 22,5$ кН; $h_D^{\text{равн}} = 1,1$ м.

Задача 2.3.3. Квадратный затвор AB со стороной $a = 1,2$ м, перекрывающий выход воды из зумпфа, укреплен шарнирно и может поворачиваться относительно оси, проходящей через центр затвора (рис. 2.6).

Определить силу F , которую нужно приложить на расстоянии $0,1a$ от нижнего края затвора, чтобы удерживать затвор в закрытом положении при глубине воды перед затвором $h = 1,5$ м.

Решение. Слева от затвора имеем открытую свободную поверхность с атмосферным давлением, справа щит также находится под действием атмосферного давления, поэтому при определении силы давления будем учитывать только силу давления жидкости, силу от атмосферного давления в таком случае не учитывают.

Решение задачи проведем *аналитическим и графо-аналитическим* методами.

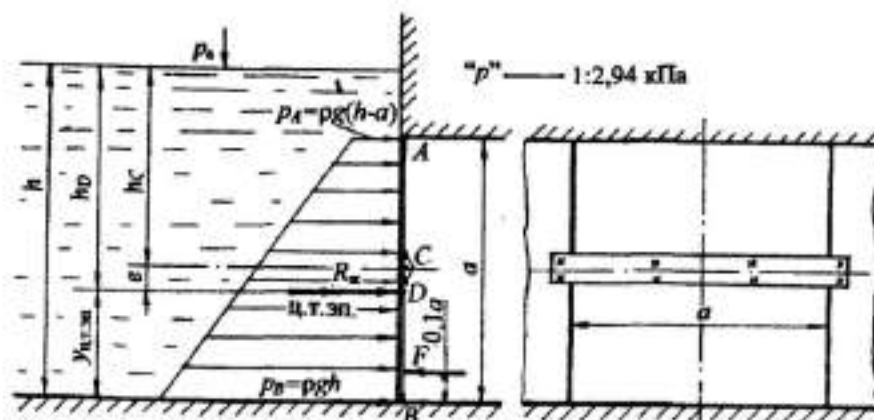


Рис. 2.6

1. Аналитический метод расчёта.

а) Рассчитаем силу давления воды по формуле (2.5)

$$R_x = \rho g h_C A,$$

где A – площадь затвора: $A = a^2 = 1,44 \text{ м}^2$;

h_C – глубина погружения центра тяжести затвора: $h_C = h - a/2 = 0,9 \text{ м}$;
покажем h_C на чертеже.

$$R_x = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,9 \cdot 1,44 = 12,7 \cdot 10^3 \text{ Н} = 12,7 \text{ кН}.$$

б) Определим глубину погружения центра давления h_D , т. е. точки приложения силы давления R_x по формуле (2.6)

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A},$$

где $\alpha = 90^\circ$; $\sin \alpha = 1,0$; центральный момент инерции относительно горизонтальной оси для квадратного затвора $I_C = a^4/12$.

После подстановки всех значений в буквенное выражение h_D и соответствующих сокращений получим:

$$h_D = h_C + \frac{a^2}{12h_C}; \quad h_D = 0,9 + 0,13 = 1,03 \text{ м}.$$

Эксцентриситет $e = 0,13 \text{ м}$.

Покажем на чертеже h_D , e и силу R_x , приложенную в центре давления (т. D)

в) Определим силу F для удержания затвора в закрытом положении, т. е. в состоянии равновесия, составив уравнение механики: сумма моментов сил относительно шарнира C равна нулю:

$$\sum M_C = 0; \quad R_x e - F \cdot 0,4a = 0, \text{ откуда } F = 3,44 \text{ кН}.$$

2. Графо-аналитический метод расчёта силы давления воды R_x и глубины погружения центра давления h_D .

а) Определим давление воды в точках A и B :

$$p_A = \rho g (h-a); \quad p_A = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,3 = 2,94 \cdot 10^3 \text{ Па} = 2,94 \text{ кПа};$$

$$p_B = \rho g h; \quad p_B = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 1,5 = 14,7 \text{ кПа}.$$

б) Строим эпюру гидростатического давления воды: в любом выбранном масштабе по нормали к стенке откладываем величину давления p_A и p_B , соединяем полученные значения наклонной прямой, так как закон изменения давления по глубине линейный (см. раздел 1.3), и заштриховываем горизонтальными штриховыми линиями, стрелками обозначив направление

давления. Получим эпюру давления воды в виде трапеции в вертикальной плоскости.

в) Рассчитаем силу давления воды R_x . Согласно формуле (2.11):

$$R_x = S_{\text{эп}} a;$$

$$S_{\text{эп}} = S_{\text{трап}} = \frac{p_A + p_B}{2} a = \frac{\rho g(h-a) + \rho g h}{2} a.$$

После подстановки данных получим: $S_{\text{эп}} = 10,6 \text{ кПа} \cdot \text{м}$; $R_x = 12,7 \text{ кН}$.

г) Определим положение центра давления. Согласно графо-аналитическому методу сила давления жидкости *проходит через центр тяжести эпюры гидростатического давления*: $h_D = h_{\text{ц.т.эп}}$. Положение центра тяжести эпюры в виде трапеции определяется по табл. 3 (см. приложение):

$$y_{\text{ц.т.эп}} = \frac{a(2p_A + p_B)}{3(p_A + p_B)} = 0,47 \text{ м}.$$

Согласно чертежу, глубина погружения центра давления h_D

$$h_D = h - y_{\text{ц.т.эп}} = 1,5 - 0,47 = 1,03 \text{ м}.$$

Таким образом, *аналитический и графо-аналитический* методы расчёта силы давления R_x и глубины погружения центра давления h_D дают одинаковые значения.

Ответ: сила $F = 3,44 \text{ кН}$.

Задача 2.3.4. Определить равнодействующую давления воды и положение центра давления на грани напорной грани плотины ABC , удерживающей напоры: $H_1 = 3,0 \text{ м}$; $H_2 = 2,0 \text{ м}$. Угол наклона наклонной грани плотины $\alpha = 60^\circ$. Длина плотины в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, $l = 10 \text{ м}$ (рис. 2.7). Решение выполнить *графо-аналитическим* методом.

Решение. Графо-аналитический метод решения предусматривает выполнение чертежа в масштабе. Представим в удобном выбранном масштабе сечение плотины и действующие напоры. Равнодействующая давления воды на грани плотины определится путём векторного сложения сил, действующих на наклонную (R_{AB}) и вертикальную (R_{BC}) грани плотины:

$$\vec{R} = \vec{R}_{AB} + \vec{R}_{BC}.$$

Расчёт силы давления на плоские поверхности *графо-аналитическим методом* проводим *по следующей методике*.

1. Определяем давление воды в характерных точках плотины *A, B* и *C* :

$$p_A = 0; \quad p_B = \rho g H_1; \quad p_C = \rho g (H_1 + H_2);$$

$$p_B = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 3,0 = 29,4 \cdot 10^3 \text{ Па} = 29,4 \text{ кПа};$$

$$p_C = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 5,0 = 49,0 \cdot 10^3 \text{ Па} = 49,0 \text{ кПа}.$$

2. Строим эпюры гидростатического давления воды.

В выбранном масштабе откладываем величину давления в точках *A, B* и *C*, помня, что давление действует нормально к плоской поверхности (см. рис. 2.7).

Эпюра давления на наклонную грань плотины представляет равномерную нагрузку в виде треугольника. Основание треугольника соответствует величине давления $p_B = \rho g H_1$, т. е. давлению в точке *B*, отложенному *по нормали к наклонной грани*.

При построении эпюры давления на вертикальную грань то же самое давление в точке *B* откладываем *нормально к вертикальной грани* плотины. В точке *C* откладываем давление $p_C = \rho g (H_1 + H_2)$ также по нормали к вертикальной грани плотины. Для вертикальной грани эпюра давления представляет равномерную нагрузку в виде трапеции (см. рис. 2.7).

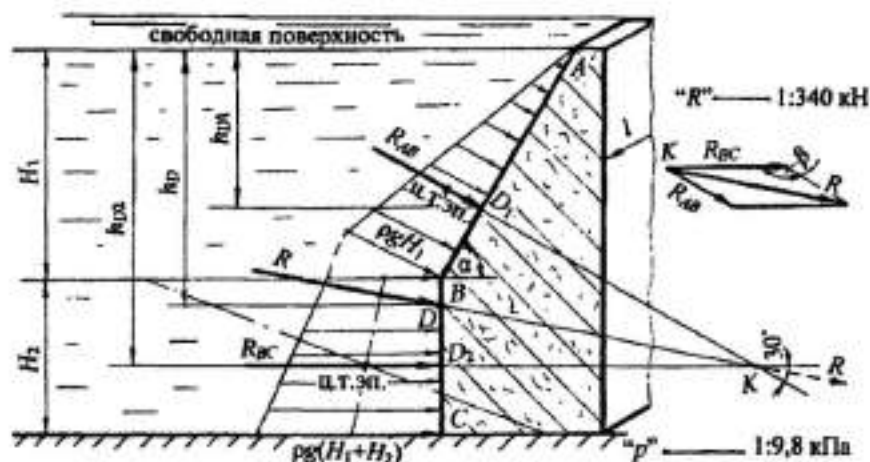


Рис. 2.7

3. Рассчитываем силы давления воды на грани плотины согласно формуле (2.11):

$$R_{AB} = S_{m1} l = S_{\text{треуг}} l = \frac{\rho g H_1^2}{2 \cdot \sin 60^\circ} l; \quad R_{AB} = 509,2 \text{ кН};$$

$$R_{BC} = S_{m2} l = S_{\text{трап}} l = \frac{\rho g H_2 + \rho g (H_1 + H_2)}{2} H_2 l; \quad R_{BC} = 784,0 \text{ кН}.$$

4. Показываем линию действия сил R_{AB} и R_{BC} .

Согласно формуле (2.11), графически сила давления жидкости *проходит* через центр тяжести эпюры гидростатического давления. Центр тяжести эпюры в виде треугольной нагрузки расположен на расстоянии $2/3$ высоты треугольника, т. е. $2/3 AB = 2/3 \cdot H_1 / \sin 60^\circ$. Находим в масштабе центр тяжести треугольника и показываем линию действия силы R_{AB} . Сила *проходит* через центр тяжести треугольника и *приложена нормально* к наклонной грани плотины в центре давления (точка D_1). Показываем на чертеже глубину погружения центра давления $h_{D1} = 2/3 H_1$.

Для определения положения центра тяжести эпюры в виде трапеции можно воспользоваться табл. 3 (см. приложение), как было отмечено в задаче 2.3.3. Поскольку метод решения задачи графо-аналитический, рассмотрим *геометрический* способ определения центра тяжести трапеции:

- а) к меньшему основанию трапеции на его продолжении в любую сторону прибавляем большее основание трапеции;
- б) к большему основанию трапеции в противоположную сторону прибавляем меньшее основание;
- в) соединяем полученные две точки прямой линией;
- г) через середины оснований трапеции проводим вторую линию;
- д) точка пересечения двух линий построения является центром тяжести эпюры давления в виде трапеции.

Показываем центр тяжести трапеции и через эту точку проводим силу R_{BC} по нормали к вертикальной грани. Учитывая масштаб действующих напоров, находим величину $h_{D2} = 4,1 \text{ м}$.

5. Определяем величину и линию действия *равнодействующей* сил давления R путём *векторного сложения* сил R_{AB} и R_{BC} . Продолжаем силы по линии действия до взаимного пересечения в точке K . По линии действия откладываем величины сил в удобном принятом масштабе и складываем их

“по правилу треугольника” или “по правилу параллелограмма”. Может быть вариант, когда точка пересечения составляющих сил расположена так, что её следует вынести за пределы чертежа, как представлено в данном решении, и произвести сложение векторов сил, затем по линии действия равнодействующую R параллельно перенести в точку пересечения составляющих и определить точку пересечения равнодействующей с плоской поверхностью.

В данной задаче (см. рис. 2.7) силу R , найденную путём векторного сложения, переносим параллельно в точку пересечения составляющих - K , по линии действия силу R продолжаем до пересечения её с гранью плотины в точке D . Точка D является центром давления для равнодействующей R . Глубину погружения центра давления h_D следует определить по масштабу. Величину равнодействующей силы определим по принятому масштабу при сложении сил. По масштабу глубина погружения центра давления $h_D = 3,5$ м.

Проверим значение силы R аналитическим расчётом, пользуясь теоремой косинусов. Угол между силами R_{AB} и R_{BC} при их сложении “по правилу треугольника” $\beta = 150^\circ$ (см. рис. 2.7). Равнодействующая сила давления воды:

$$R = \sqrt{R_{AB}^2 - 2R_{AB} R_{BC} \cos 150^\circ + R_{BC}^2};$$

$$\cos 150^\circ = -\cos 30^\circ = -0,866;$$

$$R = \sqrt{509,2^2 + 2 \cdot 509,2 \cdot 784,0 \cdot 0,866 + 784^2} = 1251,2 \text{ кН}.$$

Проверив значение силы R по масштабу, получим с допустимой точностью то же самое значение.

Ответ. Сила давления воды на напорную грань плотины $R = 1251,2$ кН. Глубина погружения центра давления $h_D = 3,5$ м.

Задача 2.3.5. Определить величину, направление и точку приложения силы давления воды на наклонную стенку AB , удерживающую напоры: слева $H = 4,5$ м, справа - $h = 1,5$ м. Длина стенки в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, $l = 5,0$ м. Угол наклона стенки к горизонту $\alpha = 45^\circ$ (рис. 2.8). Представить графо-аналитический метод решения.

Решение. Методика расчёта силы давления на плоские прямоугольные поверхности графо-аналитическим методом подробно рассмотрена в задаче 2.3.4. Решение данной задачи будет представлено более кратко.

Равнодействующую силу давления воды определим путём построения результирующей зная гидростатического давления.

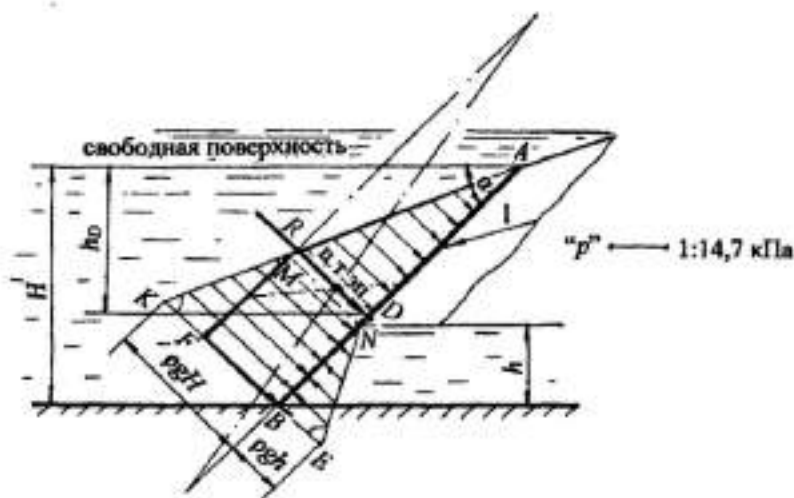


Рис. 2.8

1. Давление воды в характерных точках:

слева $p_A = 0$; $p_B^{\text{сп}} = \rho g H = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 4,5 = 44,1 \cdot 10^3 \text{ Па} = 44,1 \text{ кПа}$;

справа $p_N = 0$; $p_E^{\text{сп}} = \rho g h = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 1,5 = 14,7 \cdot 10^3 \text{ Па} = 14,7 \text{ кПа}$.

2. Строим эпюры давления воды слева и справа.

Слева эпюра давления представляет равномерную нагрузку в виде прямоугольного треугольника ABK с основанием $KB = p_B^{\text{сп}} = \rho g H$. Это давление откладываем в масштабе по нормали к стенке AB , стрелками показываем направление давления из жидкости на стенку. Справа эпюра давления также представляет равномерную нагрузку в виде треугольника NBE с основанием $BE = p_E^{\text{сп}} = \rho g h$. Давление справа является *противодавлением*, поэтому направление давления соответственно показано стрелками навстречу давлению слева, по аналогии из жидкости на плоскость. Углы наклона эпюр одинаковые, так как слева и справа жидкости одинаковой плотности - вода (см. раздел 1.3).

Из построения эпюр следует, что из эпюры давления слева (из треугольника ABK) можно вычесть эпюру давления справа (треугольник NBE). Результирующая эпюра давления представляет трапецию $FMAE$ (см. рис. 2.8).

3. Рассчитываем равнодействующую силу давления воды:

$$R = S_{\text{зп}} \cdot l = S_{\text{трап}} \cdot l = \frac{FM + AB}{2} \cdot FB \cdot l.$$

Из построения эпор (см. рис. 2.8) находим:

$$AB = H/\sin \alpha = H/\sin 45^\circ = 6,36 \text{ м};$$

$$FM = NB = h/\sin \alpha = h/\sin 45^\circ = 2,15 \text{ м};$$

$$FB = p_h^{\text{ст}} - p_h^{\text{вн}} = \rho g (H-h) = 29,4 \text{ кПа}.$$

$$R = \frac{2,15 + 6,36}{2} \cdot 29,4 \cdot 5,0 = 625,5 \text{ кН}.$$

4. Показываем линию действия равнодействующей R .

Сила проходит через центр тяжести эпоры в виде трапеции. В задаче 2.3.4 рассмотрено *геометрическое* определение центра тяжести трапеции. Путём геометрических построений покажем центр тяжести трапеции и через него проведём равнодействующую R по нормали к стенке AB . Точка пересечения линии действия равнодействующей с плоской стенкой является центром давления т. D .

Глубину погружения центра давления $h_D = 2,87 \text{ м}$ можно определить по *масштабу, вычислить* по формуле (см. приложение, табл. 3) или через координаты центров тяжести сложной фигуры, состоящей из прямоугольника и треугольника. Этот метод рассматривается в курсе сопротивления материалов. В данном учебном пособии такой метод будет представлен при определении силы давления на криволинейные поверхности.

Ответ: равнодействующая давления воды $R = 625,5 \text{ кН}$, глубина погружения центра давления $h_D = 2,87 \text{ м}$.

При расчёте силы давления жидкости на плоские, а в дальнейшем и на криволинейные поверхности могут быть случаи, когда резервуар закрыт, находится под некоторым напором, отсутствует свободная поверхность жидкости, но известно показание прибора для измерения давления на определённом уровне. Такими приборами могут быть пьезометр, манометр механический или жидкостный, вакуумметр, мановакуумметр.

В этом случае рациональным считается метод расчёта силы давления, при котором производится *перевод давления из ат, бар, мм рт. ст. и т. п. в давление столба жидкости по пьезометру*.

Задача 2.3.6. Определить силу давления масла на плоскую круглую крышку диаметром $d = 600$ мм закрытого резервуара и положение центра давления, если показание манометра, установленного на расстоянии $a = 200$ мм от нижней кромки крышки $p_{\text{ман}} = 0,11$ ат, плотность масла $\rho_{\text{масл}} = 900$ кг/м³ (рис. 2.9).

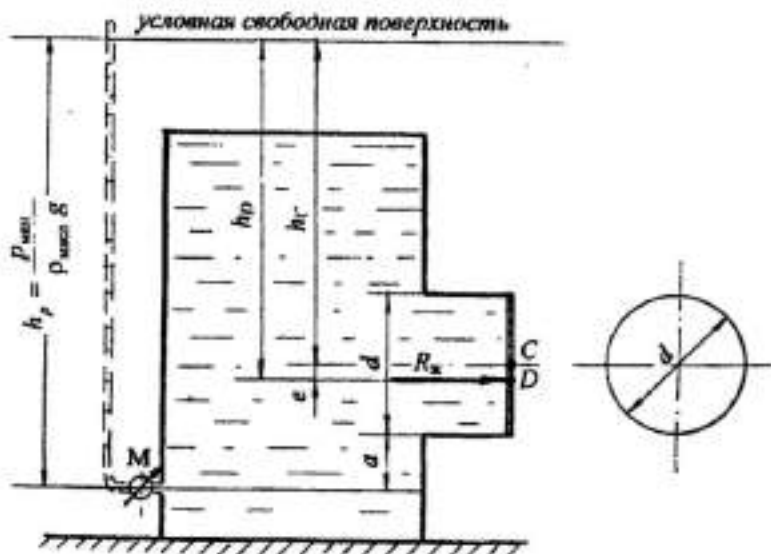


Рис. 2.9

Решение. Силу давления на плоскую круглую крышку следует рассчитывать **аналитическим** методом, графо-аналитический метод не применим.

Рассмотрим два варианта решения.

1. **Первый вариант.** Силу давления жидкости определяем по известной формуле (2.1):

$$R_x = p_c A,$$

где p_c – давление масла на уровне центра тяжести круглой крышки:

$$p_c = p_{\text{ман}} - \rho_{\text{масл}} g (a + d/2);$$

A – площадь крышки:
$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 0,2826 \text{ м}^2.$$

Значит, сила давления масла

$$R_x = \left[p_{\text{ман}} - \rho_{\text{масл}} g \left(a + \frac{d}{2} \right) \right] \frac{\pi d^2}{4};$$

$$R = (0,11 \cdot 98 \cdot 10^3 - 900 \cdot 9,8 \cdot 0,5) \cdot 0,2826 = 1,8 \cdot 10^3 \text{ Н} = 1,8 \text{ кН}.$$

Для определения положения силы R_x находим эксцентриситет из формулы (2.6)

$$e = \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A}; \quad \text{где } \alpha = 90^\circ; \quad \sin \alpha = 1,0; \quad I_C = \frac{\pi d^4}{64}.$$

После подстановки параметров в буквенном выражении получаем:

$$e = \frac{d^2}{16 h_C},$$

где h_C – глубина погружения центра тяжести крышки или напор на уровне центра тяжести, который можно рассчитать по формуле

$$h_C = \frac{P_C}{\rho_{\text{масл}} g} = \frac{P_{\text{масл}}}{\rho_{\text{масл}} g} - \left(a + \frac{d}{2}\right);$$

$$h_C = \frac{0,11 \cdot 98 \cdot 10^3}{900 \cdot 9,8} - 0,5 = 0,72 \text{ м};$$

$$e = \frac{0,6^2}{16 \cdot 0,72} = 0,031 \text{ м} = 31 \text{ мм}.$$

Отмечаем на чертеже эксцентриситет $e = 31$ мм. Эту величину откладываем ниже центра тяжести стенки и на этом уровне показываем положение силы давления масла R_x (см. рис. 2.9). Сила приложена по нормали к крышке в центре давления (т. D).

2. *Второй вариант.* Давление $p_{\text{масл}}$ на уровне установки манометра можно перевести в давление столба жидкости, условно заменив манометр пьезометром. На рис. 2.9 пьезометр представлен пунктирной линией.

Рассчитываем высоту уровня масла в пьезометре по формуле (1.5)

$$h_p = \frac{p_{\text{масл}}}{\rho_{\text{масл}} g}; \quad h_p = \frac{0,11 \cdot 98 \cdot 10^3}{900 \cdot 9,8} = 1,22 \text{ м}.$$

Так как пьезометр – это *открытая* стеклянная трубка, то таким образом можно показать *условную свободную поверхность, или пьезометрическую плоскость* (П П). От условной свободной поверхности отсчитывается глубина погружения центра тяжести крышки (ц.т.) и глубина погружения центра давления (ц.д.).

Силу давления масла рассчитываем по формуле (2.5)

$$R_{\text{ж}} = \rho_{\text{масл}} g h_C A,$$

где h_C – глубина погружения центра тяжести крышки, отсчитанная от условной свободной поверхности:

$$h_C = h_p - (\alpha + d/2); \quad h_C = 1,22 - 0,5 = 0,72 \text{ м.}$$

Тогда сила давления масла

$$R_{\text{ж}} = 900 \cdot 9,8 \cdot 0,72 \cdot 0,2826 = 1,8 \cdot 10^3 \text{ Н} = 1,8 \text{ кН.}$$

Глубина погружения центра давления от условной свободной поверхности согласно формуле (2.6):

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A} = h_C + \frac{d^2}{16h_C};$$

$$h_D = 0,72 + 0,031 = 0,751 \text{ м.}$$

На глубине h_D показываем силу давления масла. Центр давления ниже центра тяжести крышки на величину второго слагаемого, т. е. эксцентриситета $e = 0,031 \text{ м} = 31 \text{ мм}$.

Таким образом, оба варианта расчётов совпадают.

Ответ. Сила давления масла $R_{\text{ж}} = 1,8 \text{ кН}$, глубина погружения центра давления $h_D = 0,751 \text{ м}$, эксцентриситет $e = 31 \text{ мм}$.

Рассмотрим ещё несколько случаев установки измерительных приборов давления, перевод давления по прибору в давление столба жидкости и определения положения свободной поверхности.

Задача 2.3.7. Определить величину силы давления бензина на прямоугольную крышку AB высотой $h = 600 \text{ мм}$ и шириной $b = 400 \text{ мм}$, если показания U -образного ртутного манометра: ртути $h_{\text{рт}} = 40 \text{ мм}$, масла $h_{\text{масл}} = 30 \text{ мм}$; расстояния: $a = 100 \text{ мм}$, $c = 200 \text{ мм}$ (рис. 2.10).

Найти геометрическое положение центра давления.

Принять плотности жидкостей: масла $\rho_{\text{масл}} = 900 \text{ кг/м}^3$, ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, бензина $\rho_{\text{бен}} = 720 \text{ кг/м}^3$.

Решение представить *аналитическим и графо-аналитическим* методами.

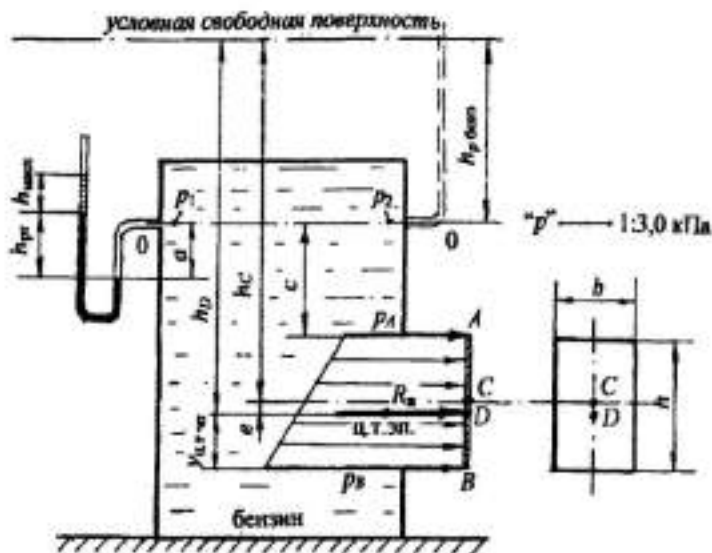


Рис. 2.10

Решение.

1. **Аналитический метод.** Силу давления бензина рассчитаем по формуле (2.5)

$$R_{\text{ж}} = \rho_{\text{бенз}} g h_{\text{с}} A,$$

где A — площадь крышки, $A = bh$;

$$R_{\text{ж}} = \rho_{\text{бенз}} g h_{\text{с}} bh.$$

Переведём показание U -образного манометра в давление столба жидкости по пьезометру.

Вспомним условие равенства давления относительно плоскости уровня 0-0 (см. главу 1; параграф 1.5), учитывая только избыточное давление (см. рис. 2.10):

$$p_1 = p_2$$

$$p_1 = \rho_{\text{мкс}} g h_{\text{мкс}} + p_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} - \rho_{\text{бенз}} g a;$$

$$p_2 = \rho_{\text{бенз}} g h_{\text{р.бенз}}$$

$$\rho_{\text{мкс}} g h_{\text{мкс}} + p_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} - \rho_{\text{бенз}} g a = \rho_{\text{бенз}} g h_{\text{р.бенз}}$$

Отсюда

$$h_{\text{р.бенз}} = \frac{\rho_{\text{мкс}} h_{\text{мкс}} + p_{\text{рт}} h_{\text{рт}}}{\rho_{\text{бенз}}} - a;$$

$$h_{p_{\text{бен}}} = -\frac{900 \cdot 0,03 + 13,6 \cdot 10^3 \cdot 0,04}{720} - 0,1 = 0,693 \text{ м.}$$

Рассчитаем глубину погружения центра тяжести крышки от условной свободной поверхности:

$$h_C = h_{p_{\text{бен}}} + c + h/2; \quad h_C = 1,193 \text{ м} = 1,2 \text{ м.}$$

Определим силу давления бензина:

$$R_{\text{ж}} = 720 \cdot 9,8 \cdot 1,2 \cdot 0,4 \cdot 0,6 = 2,0 \cdot 10^3 \text{ Н} = 2,0 \text{ кН.}$$

Глубину погружения центра давления от условной свободной поверхности определяем по известной формуле (2.6)

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A}; \quad \alpha = 90^\circ; \quad \sin \alpha = 1,0.$$

Подставив в формулу h_D значение центрального момента инерции для прямоугольника $I_C = bh^3/12$ (см. табл. 3, приложение), получим:

$$h_D = h_C + h^2/12h_C; \quad h_D = 1,2 + 0,025 \text{ м} = 1,225 \text{ м.}$$

Эксцентриситет соответствует второму слагаемому: $e = 0,025 \text{ м} = 25 \text{ мм.}$

2. *Графо-аналитический метод* определения силы давления бензина:

а) определяем давление в характерных точках A и B :

$$p_A = \rho_{\text{масл}} g h_{\text{масл}} + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} + \rho_{\text{бен}} g (c - a); \quad p_A = 6,3 \text{ кПа;}$$

$$p_B = p_A + \rho_{\text{бен}} g h; \quad p_B = 10,53 \text{ кПа.}$$

б) строим эпюры гидростатического давления в удобном масштабе. По нормали к стенке AB откладываем величину давления p_A и p_B (см. рис. 2.10).

в) рассчитываем силу давления бензина $R_{\text{ж}}$ по формуле (2.11)

$$R_{\text{ж}} = S_{\text{ж}} b;$$

$$R_{\text{ж}} = \frac{p_A + p_B}{2} hb; \quad R_{\text{ж}} = 2,0 \text{ кН.}$$

г) определяем положение центра тяжести эпюры, т. е. центра тяжести трапеции по табл. 3 (см. приложение):

$$y_{\text{ц.т.ж.}} = \frac{h(p_B + 2p_A)}{3(p_A + p_B)}; \quad y_{\text{ц.т.ж.}} = 0,275 \text{ м.}$$

д) через центр тяжести эпюры проводим силу давления бензина R_x .
Проверяем величину эксцентриситета e :

$$e = h/2 - y_{\text{ц.т.ж.}};$$

$$e = 0,3 - 0,275 = 0,025 \text{ м} = 25 \text{ мм.}$$

Результаты расчёта силы давления бензина и геометрического положения центра давления двумя методами совпадают.

Ответ: $R_x = 2,0 \text{ кН}$; $h_D = 1,225 \text{ м}$; $e = 25 \text{ мм}$.

Задача 2.3.8. Определить силу давления воды на наклонную прямоугольную стенку AB , перпендикулярную плоскости чертежа, наклонённую под углом α к горизонту, перекрывающую патрубок шириной b и высотой h . Давление на поверхности воды соответствует $p_{\text{ман}}$. Уровень воды над верхней кромкой крышки равен a (рис. 2.11).

Решение представить в буквенном выражении.

Решение. Схема расположения прямоугольной крышки AB аналогична схеме к задаче 2.3.1 (см. рис. 2.2). Покажем более рациональный подход к решению задачи.

Переведём показание манометра в давление столба воды. Покажем на чертеже (см. рис. 2.11) пунктиром пьезометр от свободной поверхности воды, получим высоту (напор) $h_{\text{ман}} = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho g}$.

Условно можно представить, что над свободной поверхностью *взамен манометрического давления действует давление столба воды $h_{\text{ман}}$* . Покажем пунктиром эту жидкость и *условную свободную поверхность*.

Теперь от условной свободной поверхности будем отсчитывать глубину погружения центра тяжести плоской стенки (h_C) и глубину погружения центра давления (h_D).

Рассчитываем силу давления жидкости R_x по формуле (2.5)

$$R_x = \rho g h_C A,$$

где h_C — глубина погружения центра тяжести стенки:

$$h_C = h_{\text{ман}} + a + h/2;$$

A — площадь стенки: $A = bh/\sin \alpha$.

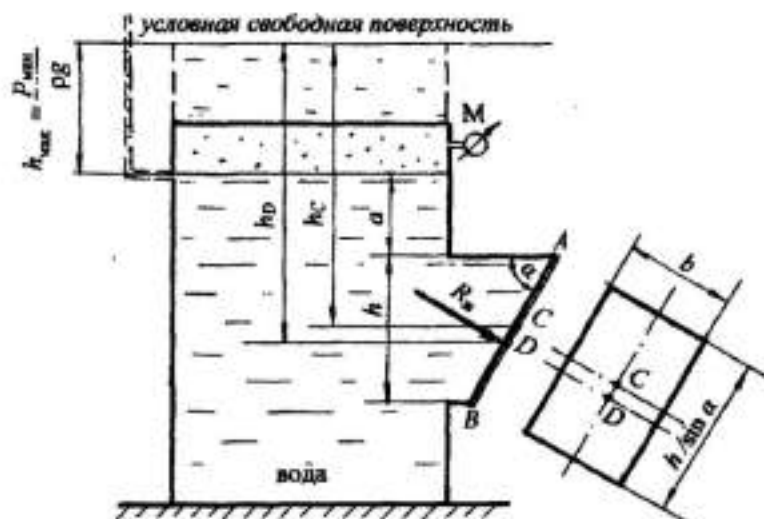


Рис. 2.11

Покажем на рис. 2.11 глубину погружения центра тяжести стенки h_C . Получим выражение для силы давления воды:

$$R_{\text{ж}} = \rho g (h_{\max} + a + h/2) b h / \sin \alpha.$$

Покажем линию действия силы давления воды. Сила $R_{\text{ж}}$ приложена по нормали из жидкости на стенку AB на глубине h_D , согласно формуле (2.6)

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A},$$

где I_C - центральный момент инерции стенки AB относительно горизонтальной оси для прямоугольника (см. табл. 3 в приложении):

$$I_C = \frac{b h^3}{12 \sin^3 \alpha}.$$

После подстановки данных и соответствующих сокращений получим:

$$h_D = h_C + \frac{h^2}{12 h_C}.$$

Покажем на рис. 2.11 глубину погружения центра давления h_D и силу давления воды R_x : сила приложена в центре давления по нормали к наклонной поверхности.

Таким образом, этот метод решения следует признать более простым и рациональным и применять при расчёте силы давления жидкости как на плоские, так и на криволинейные поверхности.

Рассмотрим случай, когда известно *вакуумметрическое давление* на определённом уровне закрытого резервуара. В этом случае можно не показывать пьезометр и условную свободную поверхность, а представить решение путём *логических рассуждений* (см. задачу 2.3.9).

Задача 2.3.9. Определить силу давления воды на круглую крышку диаметром d закрытого резервуара, если известно показание вакуумметра $p_{\text{вак}}$ на высоте h от центра тяжести крышки (рис. 2.12).

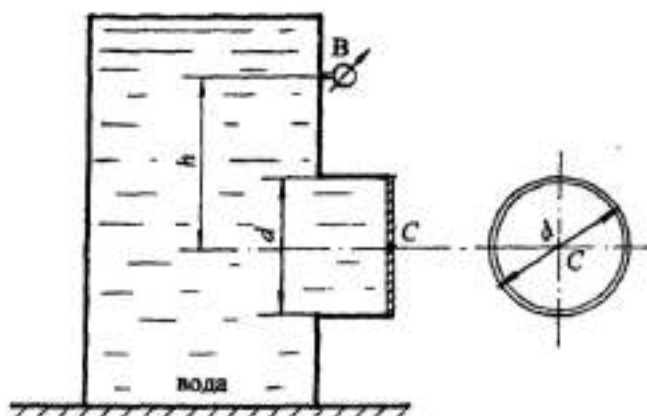


Рис. 2.12

Силу давления воды рассчитаем по известной формуле (2.1)

$$R_x = p_C A,$$

где A – площадь крышки: $A = \pi d^2/4$;

p_C – давление на уровне центра тяжести крышки.

Здесь следует помнить, что при решении задачи *манометрическое* давление учитывается со знаком “+”, а *вакуумметрическое* – со знаком “-” (см. раздел 1.2):

$$p_C = (-p_{\text{вак}} + \rho g h),$$

тогда

$$R_{\text{ж}} = (\rho g h - p_{\text{max}}) \pi d^2 / 4. \quad (2.12)$$

Пересчитаем пьезометрический напор на уровне центра тяжести крышки АВ:

$$h_C = \frac{p_C}{\rho g} = h - \frac{p_{\text{max}}}{\rho g}.$$

Центр давления находится на расстоянии эксцентриситета e от центра тяжести крышки, из формулы (2.6) имеем:

$$e = \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A}, \quad \text{где } \alpha = 90^\circ; \quad \sin \alpha = 1,0; \quad I_C = \frac{\pi d^4}{64}.$$

После подстановки параметров получим:

$$e = \frac{d^2}{16 h_C}.$$

Рассмотрим три возможных варианта значения силы давления $R_{\text{ж}}$ в положении центра давления (рис. 2.13).

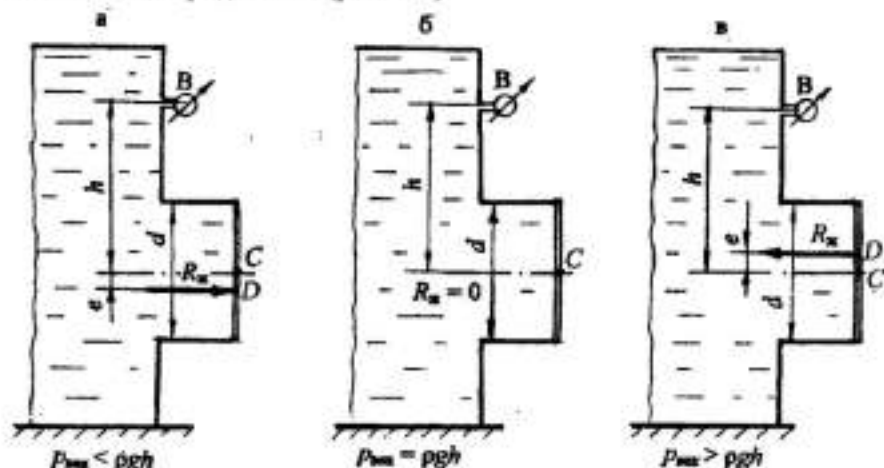


Рис. 2.13

1. Вакуумметрическое давление *меньше* давления воды от уровня установки вакуумметра до центра тяжести крышки, т. е. $\rho g h > p_{\text{max}}$. Согласно формуле (2.12), получим положительное значение силы давления жидкости $R_{\text{ж}}$.

Сила направлена из жидкости на стенку. Значение эксцентриситета e также величина положительная. Сила давления приложена ниже центра тяжести на величину эксцентриситета (e) (см. рис. 2.13, а).

2. Вакуумметрическое давление $p_{\text{вак}} = \rho g h$. Из расчётной формулы (2.12) получим $R_{\text{ж}} = 0$. Это значит, что сила давления воды уравнивается силой вакуумметрического давления (см. рис. 2.13, б).

3. Вакуумметрическое давление *больше* давления воды на уровне центра тяжести крышки: $p_{\text{вак}} > \rho g h$. При подстановке в расчётную формулу (2.12) получим отрицательное значение силы $R_{\text{ж}}$. Это значит, что сила будет направлена *внутрь* жидкости за счёт вакуумметрического давления.

Значение эксцентриситета e также получается *отрицательным*, значит, центр давления расположен *выше* центра тяжести крышки (см. рис. 2.13, в).

Ниже предлагаются задачи для самостоятельной работы с использованием теоретических положений по определению силы давления жидкости на плоские поверхности.

2.4. Задачи для самостоятельной работы по теме: "Сила давления жидкости на плоские поверхности"

Задача 2.4.1

Выход из резервуара, заполненного водой, представляет патрубок, который закрывается круглой крышкой диаметром $D = 600$ мм. Крышка может поворачиваться вокруг шарнира A .

Определить силу T для удержания крышки в закрытом положении, если показание ртутного манометра $h_{\text{рт}} = 120$ мм, высота уровня масла над ртутью $h_{\text{м}} = 50$ мм. Принять $a = 500$ мм, плотность ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³ (рис. 2.14).

Ответ: $T \geq 3,53$ кН.

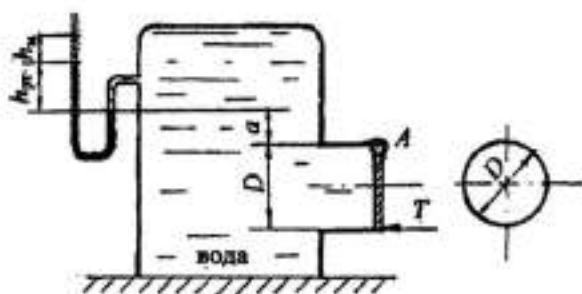


Рис. 2.14

Задача 2.4.2

Патрубок резервуара с маслом перекрывается круглой крышкой, поворачивающейся вокруг шарнира A . Определить, каким должно быть показание U-образной трубки, заполненной ртутью ($h_{рт}$), установленной на поверхности масла, чтобы крышка находилась в закрытом положении за счёт вакуума.

Принять: диаметр крышки $D = 600$ мм, глубину масла до шарнира A равной $h = 200$ мм, плотность масла $\rho_{мас} = 900$ кг/м³, плотность ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³ (рис. 2.15). Ответ: $h_{рт} = 38$ мм.

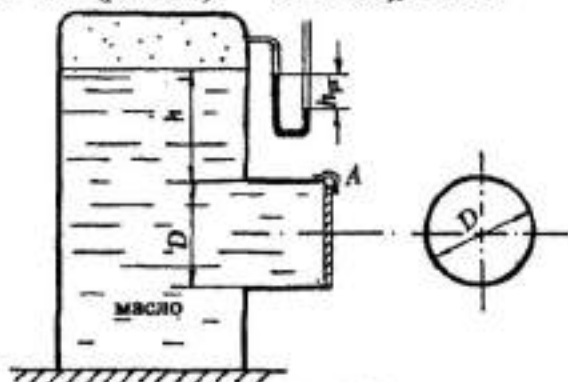


Рис. 2.15

Задача 2.4.3

В вертикальной перегородке отстойника, состоящего из двух резервуаров - A и B , сделано квадратное отверстие со стороной $a = 600$ мм, которое перекрывается крышкой, поворачивающейся вокруг шарнира O .

Определить, какой наименьший вакуум нужно создать на поверхности воды в закрытом резервуаре A , чтобы крышка оставалась в закрытом положении. Резервуар B открыт. Принять $H_1 = 1,5$ м; $H_2 = 0,8$ м (рис. 2.16).

Ответ: $p_{вак} = 6,86$ кПа.

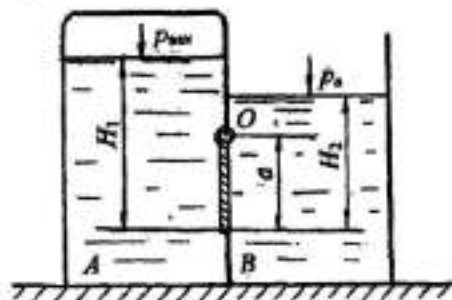


Рис. 2.16

Задача 2.4.4

Отстойник для воды разделён вертикальной перегородкой, в которой сделано круглое отверстие диаметром $D = 0,6$ м с крышкой, поворачивающейся вокруг шарнира O . Закрытое положение крышки обеспечивается избыточным давлением на поверхности воды в закрытом резервуаре B . Резервуар A открыт.

Определить, при каком показании манометра в резервуаре B крышка останется в закрытом положении. Принять $H_1 = 2,3$ м; $H_2 = 0,8$ м (рис. 2.17).

Ответ: $p_{\text{ман}} = 0,15$ ат.

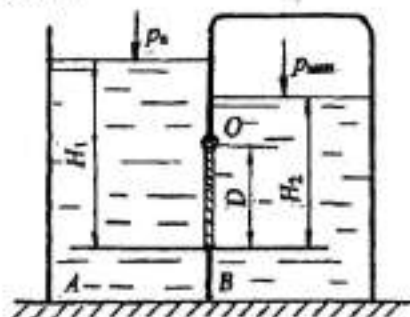


Рис. 2.17

Задача 2.4.5

Определить величину и направление силы N , приложенной к штоку гидроцилиндра для удержания его на месте, если показание мановакуумметра $p_{\text{мв}}$: а) $p_{\text{мв}} = p_{\text{ман}} = 0,12$ ат, б) $p_{\text{мв}} = p_{\text{ман}} = 0,11$ ат. Гидроцилиндр заполнен маслом плотностью $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³, диаметр поршня $d = 100$ мм, высота уровня масла на уровне оси поршня $H = 0,8$ м (рис. 2.18).

Ответ: а) $N = 147,711$ (направлена влево), б) $N = 29,2$ Н (направлена вправо).

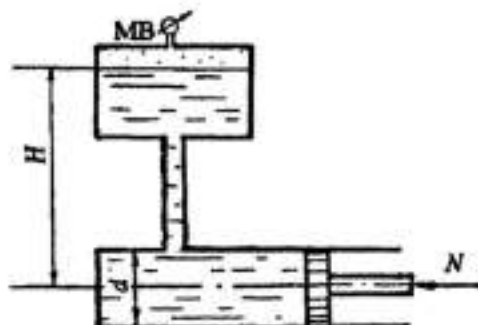


Рис. 2.18

Задача 2.4.6

Определить силу давления бензина на треугольный затвор шириной $b = 600$ мм и высотой $h = 800$ мм, а также положение центра давления, если показание манометра, установленного на расстоянии $a = 300$ мм от верхней кромки затвора $p_{\text{ман}} = 0,11$ ат (рис. 2.19).

Плотность бензина принять $\rho_{\text{бен}} = 720$ кг/м³.

Ответ: $R_x = 4,0$ кН, эксцентриситет $e = 15,0$ мм.

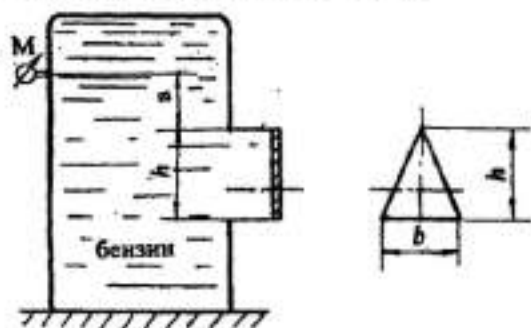


Рис. 2.19

Задача 2.4.7

Определить величину и положение равнодействующей сил давления воды на плоскую ломаную стенку ABC , удерживающую слева напор воды $H = 5,0$ м, справа $h = 2,0$ м. Длина стенки в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, $L = 6,0$ м. Верхняя часть стенки наклонена под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту. Расчёт выполнить графо-аналитическим методом (рис. 2.20).

Ответ: $R = 636$ кН.

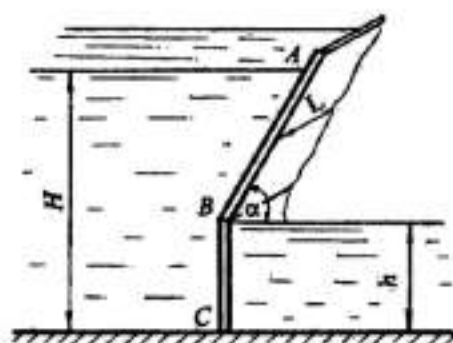


Рис. 2.20

Задача 2.4.8

Определить величину и положение равнодействующей сил давления воды на плоскую ломаную стенку ABC , удерживающую напоры $H_1 = 3,0$ м и $H_2 = 1,5$ м, если длина стенки $L = 5,0$ м, угол наклона нижней части стенки к горизонту $\alpha = 45^\circ$. Расчёты выполнить графо-аналитическим методом, показать положение центра давления (рис. 2.21).

Ответ: $R = 568$ кН.

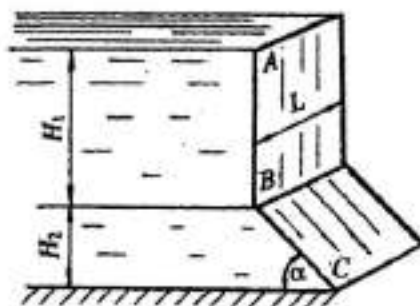


Рис. 2.21

Задача 2.4.9

Определить нормальное усилие F , приложенное к наклонной крышке AB для удержания крышки в закрытом положении. Крышка расположена под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту, укреплена с помощью шарнира B и перекрывает патрубок квадратного сечения со стороной $a = 200$ мм. Патрубок заполнен маслом плотностью $\rho_{\text{масл}} = 900$ кг/м³.

К дну патрубка присоединён пьезометр, показание которого $H = 300$ мм. Сила F приложена на расстоянии $b = 50$ мм от стенки патрубка (рис. 2.22).

Ответ: $F_{\text{min}} = 27,9$ Н.

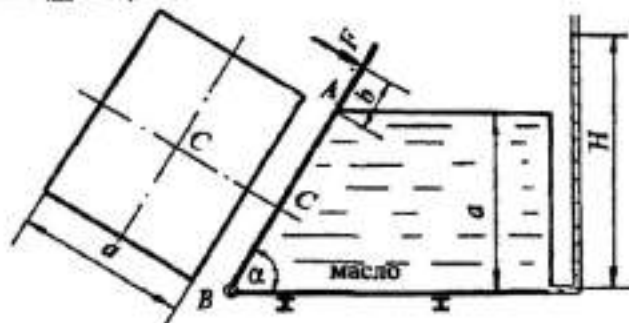


Рис. 2.22

Задача 2.4.10

Патрубок маслобака квадратного сечения со стороной $a = 150$ мм перекрывается крышкой AB , перемещающейся в вертикальных пазах. Определить силу F для открытия крышки, если показание манометра, установленного на верхней стенке патрубка, $p_{\text{ман}} = 0,12$ ат. Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900$ кг/м³, коэффициент трения скольжения в пазах $f = 0,5$. Масса крышки $M = 2,0$ кг (рис. 2.23).

Ответ: $F = 159,0$ Н.

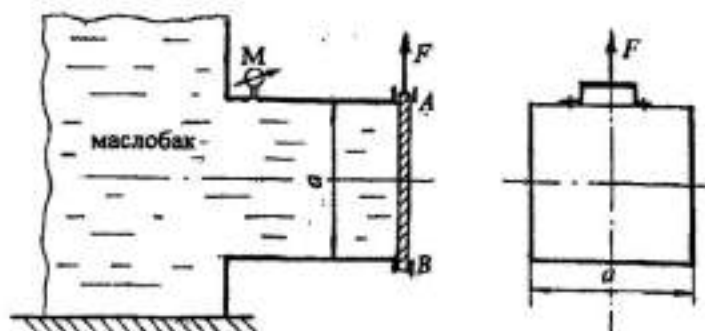


Рис. 2.23

Задача 2.4.11

В закрытом резервуаре с водой круглое донное отверстие закрывается крышкой $D = 300$ мм, шарнирно укрепленной в точке A .

Определить наименьшую силу натяжения троса T для открытия крышки. Трос укреплен под углом $\alpha = 60^\circ$. Принять показание манометра на поверхности воды $p_{\text{ман}} = 0,12$ ат, глубину заполнения резервуара $H = 1,5$ м; массу крышки $M = 2,0$ кг. Трением в шарнире и направляющих троса пренебречь (рис. 2.24).

Ответ: $T_{\text{min}} = 1,09$ кН.

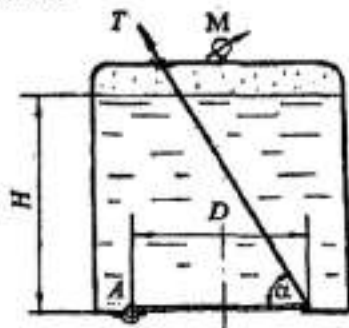


Рис. 2.24

Задача 2.4.12

Закрытый резервуар, заполненный водой, находится под давлением. В резервуаре донное круглое отверстие диаметром $d = 300$ мм закрывается крышкой $D = 380$ мм, закреплённой шарниром в точке A . Определить силу F , удерживающую крышку в закрытом положении, если масса крышки $M = 3,0$ кг. Показание манометра на расстоянии $h = 1,5$ м от дна $p_{\text{ман}} = 0,25$ ат (рис. 2.25).

Ответ: $F = 1,4$ кН.

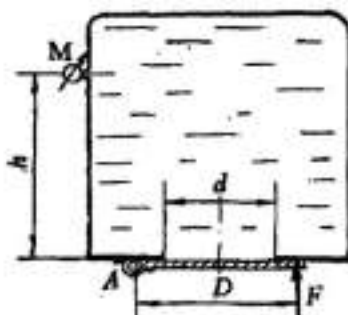


Рис. 2.25

Задача 2.4.13

Определить давление p в правой части гидроцилиндра диаметром $D = 200$ мм, заполненного маслом "Индустриальное 20". Сила, действующая на шток $d = 50$ мм при равновесном состоянии поршня, $F = 2,0$ кН. Принять избыточное давление на поверхности масла $p_0 = 0,8$ ат, напор масла на уровне оси поршня $H = 1,5$ м, плотность масла $\rho_{\text{масл}} = 890$ кг/м³ (рис. 2.26).

Ответ: $p = 29,55$ кПа.

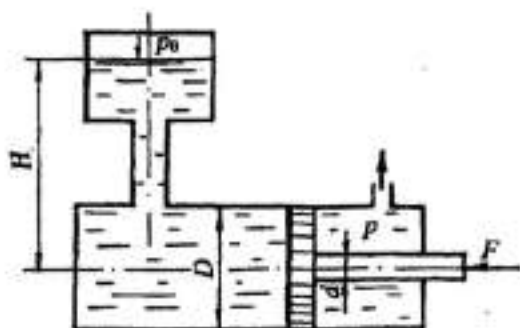


Рис. 2.26

Задача 2.4.14

Прямоугольный плоский щит, перекрывающий канал шириной $B = 2,0$ м, сверху поддерживается двумя крюками, а внизу соединён шарнирно с дном канала. Слева щит удерживает напор воды $h_1 = 2,1$ м, справа - $h_2 = 0,9$ м. Крюки укреплены на расстоянии $a = 0,5$ м от верхнего уровня воды. Определить реакции крюков $R_{кр}$ от действия воды на щит (рис. 2.27).

Ответ: $R_{кр} = 5,36$ кН.

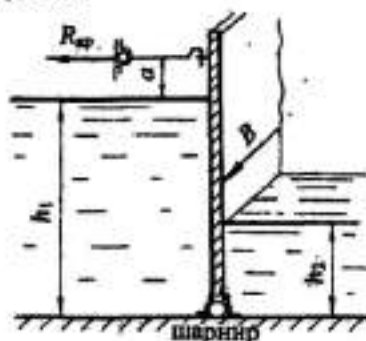


Рис. 2.27

Задача 2.4.15

Определить усилие T , которое нужно приложить к вертикальному тросу для открытия щита, перекрывающего канал прямоугольного сечения. Щит расположен под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту и закреплён шарнирно в т. O к опоре. Ширина щита в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, $B = 3,0$ м. Глубина воды перед щитом $H_1 = 2,0$ м, за щитом $H_2 = 0,7$ м. Уровень воды над шарниром $h = 0,5$ м. Масса щита $M = 400$ кг (рис. 2.28).

Представить аналитическое и графо-аналитическое решение.

Ответ: $T = 64,4$ кН.

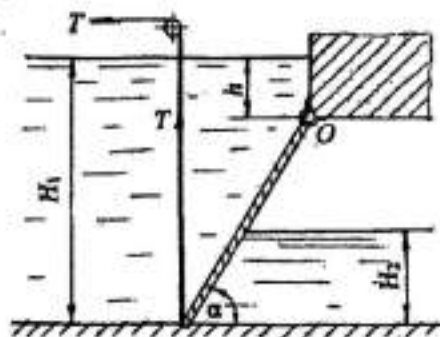


Рис. 2.28

СИЛА ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА КРИВОЛИНЕЙНЫЕ
ПОВЕРХНОСТИ

3.1. Основные понятия и теоретические положения

Примерами криволинейных поверхностей, испытывающих давление покоящейся жидкости, являются сферические и цилиндрические стенки резервуаров, секторные, сферические и цилиндрические затворы, клапаны насосов, поверхности трубопроводов и т. п.

В практике инженерных расчётов ставятся задачи определения силы давления на криволинейные поверхности, необходимые усилия для открытия клапанов и затворов или удержания их в закрытом положении.

Сложность определения силы давления на криволинейные поверхности заключается в том, что каждое элементарное усилие, действующее на криволинейную поверхность, направлено по нормали к элементарной площадке и имеет угол наклона по отношению к другому элементарному усилию.

Это значит, что при определении силы давления жидкости придётся интегрировать зависимость элементарной силы dR по площади криволинейной поверхности. Для инженерных расчётов это затруднительно.

В связи с этим принят *метод*, согласно которому равнодействующая давления на криволинейную поверхность определяется как геометрическая сумма составляющих по двум или трём выбранным направлениям:

$$\vec{R} = \vec{R}_x + \vec{R}_y + \vec{R}_z. \quad (3.1)$$

Чаще всего криволинейные поверхности, используемые в технике, имеют ось симметрии или ось вращения. Для таких поверхностей при определении силы давления жидкости достаточно двух составляющих горизонтальной и вертикальной:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}. \quad (3.2)$$

Горизонтальная составляющая силы давления на криволинейную поверхность равна силе давления жидкости на плоскую вертикальную проекцию криволинейной поверхности:

$$R_x = \rho g y_c A_y, \quad (3.3)$$

где ρ — плотность жидкости;

A_y — площадь вертикальной проекции криволинейной поверхности;

y_C – координата центра тяжести вертикальной проекции, отсчитываемая от свободной поверхности.

Глубина погружения центра тяжести вертикальной проекции h_C совпадает с координатой центра тяжести y_C , поэтому в дальнейшем y_C можно называть глубиной погружения центра тяжести или напором на уровне центра тяжести вертикальной проекции криволинейной поверхности.

Другими словами, чтобы найти горизонтальную составляющую, нужно криволинейную поверхность спроектировать внутрь жидкости на вертикальную плоскость и найти силу давления на полученную проекцию.

Сравнивая формулу (3.3) с формулой силы давления жидкости на плоскую стенку (2.5), видим аналогию расчётных зависимостей. Значит, координату y_D или глубину погружения точки приложения горизонтальной составляющей, т. е. центра давления, определяем по формуле для вертикальной плоской поверхности:

$$y_D = y_C + \frac{I_C}{y_C A_y}, \quad (3.4)$$

где I_C – центральный момент инерции вертикальной проекции относительно горизонтальной оси.

Вертикальная составляющая силы давления на криволинейную поверхность равна силе тяжести жидкости в объёме "тела давления":

$$R_y = \rho g V_{т.д.}, \quad (3.5)$$

где $V_{т.д.}$ – объём тела давления.

Рассмотрим понятие "тело давления".

Тело давления – это криволинейный объём, ограниченный:

- а) самой криволинейной поверхностью;*
- б) поверхностью, образованной вертикальными проектирующими линиями, проведёнными из контура криволинейной поверхности до свободной поверхности или её продолжения;*
- в) горизонтальной проекцией криволинейной поверхности на свободную поверхность жидкости или её продолжение.*

Различают два вида тела давления.

1. Реальное, действительное или положительное тело давления.

Это случай, когда тело давления построено на смоченной части криволинейной поверхности, заполнено жидкостью, т. е. сила тяжести жидкости реально действует на криволинейную поверхность. Вертикальная составляющая силы давления R_y из центра тяжести объёма тела давления направлена *вниз* и также считается *положительной*.

Примеры *положительного* тела давления и *вертикальной составляющей* для криволинейной поверхности *AB* представлены на рис. 3.1.



Рис. 3.1

2. Фиктивное, мнимое или отрицательное тело давления.

Это случай, когда жидкость находится вне криволинейной поверхности, тело давления построено на *несмоченной* части криволинейной поверхности. Жидкость в объеме тела давления отсутствует. Вертикальная составляющая R_y из центра тяжести объема тела давления направлена *вверх* и считается *отрицательной*.

Примеры *отрицательного* тела давления и *вертикальной составляющей* для криволинейной поверхности *CD* приведены на рис.3.2.



Рис. 3.2

Из определения понятия тела давления и примеров построения тела давления можно представить *методику* построения тела давления.

Чтобы определить объем тела давления и его вид (положительное или отрицательное), нужно из контура криволинейной поверхности, т. е. из всех точек криволинейной поверхности, провести вертикальные линии до

свободной поверхности жидкости или её продолжения. Если очерченный вертикальными линиями объём *заполнен* жидкостью, тело давления построено на *смоченной* части криволинейной поверхности, оно считается *положительным*. Стрелками, направленными *вниз*, показываем, что жидкость давит на криволинейную поверхность (см. рис. 3.1).

Таким образом, выделенный объём можно назвать *элюрой тела давления*. Определяем положение центра тяжести тела давления. Из центра тяжести объёма вертикальную составляющую R , направляем *вниз*.

В противном случае, если очерченный вертикальными линиями объём тела давления построен на *несмоченной* поверхности и *не заполнен* жидкостью, тело давления считается *отрицательным*. Стрелками, направленными *вверх*, показываем, что жидкость как бы вытеснена за счёт конфигурации криволинейной поверхности. Из центра тяжести отрицательного тела давления вертикальная составляющая R , направлена также *вверх* (см. рис. 3.2).

Рассмотрим случай, когда при построении может получиться не одно, а два тела давления (рис. 3.3).

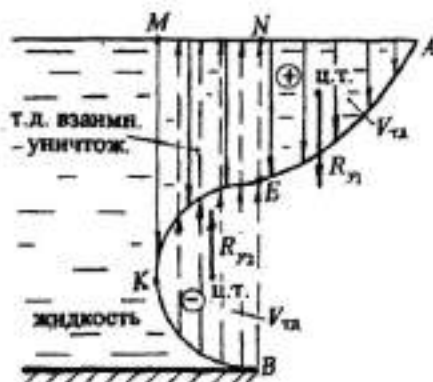


Рис. 3.3

Имеем криволинейную поверхность AKB , удерживающую некоторый напор жидкости. Криволинейную поверхность можно разделить на две части - AK и KB .

Для части AK строим тело давления по приведённой методике. Получаем *положительное* тело давления объёмом AKM , построенным на смоченной поверхности AK .

Для части криволинейной поверхности KB тело давления объёмом $KBNM$, построенное на *несмоченной* поверхности KB , *отрицательное*.

В объёме $KMNE$ происходит наложение отрицательного тела давления на положительное, два тела давления *взаимно уничтожаются* (компенсируются, сокращаются).

После построений имеем два тела давления: *положительное* объёмом ANE , сила R_1 из центра тяжести тела давления направлена *вниз*; *отрицательное* объёмом EKB , сила R_2 направлена *вверх*.

В приведённых примерах “тела давления” этору *положительного* тела давления заштриховываем *сплошными* линиями, *отрицательного* – *пунктирными*. Такую же штриховку будем показывать в приведённых примерах и задачах.

Предлагается рассмотреть примеры расчёта силы давления жидкости на криволинейные поверхности различной сложности.

3.2. Примеры решения задач по теме:

“Расчёт силы давления жидкости на криволинейные поверхности”

Задача 3.2.1. Цилиндрический затвор диаметром $D = 0,6$ м перекрывает прямоугольное отверстие в вертикальной стенке, удерживающей напор воды. Высота отверстия равна диаметру затвора, длина отверстия $L = 2,0$ м. Уровень воды над верхней кромкой затвора $h = 0,2$ м. Затвор может поворачиваться относительно горизонтальной оси и, перемещаясь, открывать отверстие (рис. 3.4).

Определить величину и угол наклона к горизонту силы давления воды на цилиндрический затвор.

Решение. На рис. 3.4,а показан общий вид затвора. Решение представим в плоском чертеже для вертикального сечения затвора, при этом длина затвора L перпендикулярна плоскости чертежа (рис. 3.4,б). Для наглядности и лучшего понимания чертёж выполнен в *масштабе*.

На примере решения этой задачи представлена *методика* расчёта силы давления жидкости на криволинейные поверхности.

1. Выбираем два направления x и y , по которым определяем составляющие силы давления жидкости. Сила полного давления R :

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}.$$

Для данной цилиндрической поверхности достаточно двух направлений, так как поверхность имеет ось симметрии.

отсчитывается от свободной поверхности вниз. Ось x направляем по свободной поверхности вправо по направлению действия жидкости (см. рис. 3.4, б).

2. Определяем горизонтальную составляющую R_x по формуле (3.3):

$$R_x = \rho g y_C A_y.$$

Криволинейную поверхность AB спроектируем *внутрь* жидкости на вертикальную плоскость. Получим вертикальную проекцию $A'B'$, представляющую прямоугольник высотой D и шириной (длиной) L (см. рис. 3.4, а). Рассчитаем силу давления воды на эту вертикальную проекцию.

Площадь вертикальной проекции $A_y = DL$.

Координата, или глубина погружения центра тяжести C этой проекции

$$y_C = h + D/2 = 0,5 \text{ м.}$$

Покажем на чертеже y_C . Рассчитаем горизонтальную составляющую:

$$R_x = \rho g (h + D/2)DL; \quad (3.6)$$

$$R_x = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,5 \cdot 0,6 \cdot 2,0 = 5,88 \cdot 10^3 \text{ Н} = 5,88 \text{ кН.}$$

Определяем глубину погружения центра давления y_D для горизонтальной составляющей, т. е. глубину точки приложения силы R_x по формуле (3.4):

$$y_D = y_C + \frac{I_C}{y_C A_y};$$

где I_C - центральный момент инерции относительно горизонтальной оси для вертикальной проекции криволинейной поверхности. Момент инерции для прямоугольника, согласно табл. 3 (см. приложение):

$$I_C = \frac{LD^3}{12}.$$

После подстановки данных получим:

$$y_D = y_C + \frac{LD^3}{12 y_C DL} = y_C + \frac{D^2}{12 y_C}; \text{ эксцентриситет } e = \frac{D^2}{12 y_C};$$

$$y_D = 0,5 + \frac{0,6^2}{12 \cdot 0,5} = 0,5 + 0,06 = 0,56 \text{ м}; \quad e = 0,06 \text{ м} = 6 \text{ см.}$$

Покажем на чертеже y_D , эксцентриситет e и положение силы R_x .

Горизонтальную составляющую R_x можно определить также графо-аналитическим методом, согласно формуле (2.11):

$$R_x = S_{\text{зм}} L.$$

Определим давление воды в точках A' и B' :

$$p_{A'} = \rho g h; \quad p_{A'} = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,2 = 1,96 \cdot 10^3 \text{ Па} = 1,96 \text{ кПа}.$$

$$p_{B'} = \rho g(h + D); \quad p_{B'} = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,8 = 7,84 \cdot 10^3 \text{ Па} = 7,84 \text{ кПа}.$$

Построим эпюру гидростатического давления (см. рис. 3.4, а). Эпюра представляет призму с основанием в виде трапеции и высотой L , тогда

$$R_x = S_{\text{трап}} L = \frac{\rho g h + \rho g(h + D)}{2} DL = \rho g(h + D/2)DL.$$

Получили формулу, соответствующую формуле (3.6).

Находим графически положение центра давления. Можно воспользоваться данными табл. 3 (см. приложение). Глубина погружения центра давления, согласно формуле (2.11), совпадает с положением центра тяжести эпюры в виде трапеции (см. рис. 3.4, а). Находим координату центра тяжести эпюры:

$$y_{\text{ц.т.э.}} = \frac{D(2p_{A'} + p_{B'})}{3(p_{A'} + p_{B'})} = 0,24 \text{ м}.$$

Центр тяжести трапеции можно определить геометрическим построением (см. задачу 2.3.4).

На рис. 3.4, в покажем $y_{\text{ц.т.э.}}$, получим $y_D = h + D - y_{\text{ц.т.э.}} = 0,56 \text{ м}$. Расчёты горизонтальной составляющей R_x и глубины погружения центра давления y_D аналитическим и графо-аналитическим методами совпали.

3. Определяем вертикальную составляющую R_y силы давления воды на цилиндрическую поверхность по формуле (3.5):

$$R_y = \rho g V_{\text{т.д.}}$$

Криволинейная поверхность имеет две части - AC и CB .

Строим тело давления для части AC . Из контура криволинейной части AC проводим вертикальные линии до *свободной поверхности* жидкости, получим *реальное* (положительное) тело давления в виде криволинейной призмы с основанием $AKMC$, построенное на смоченной поверхности AC и заполненное водой. В эпюре тела давления стрелки направляем *вниз*.

Для части криволинейной поверхности *СВ* снова проводим вертикальные линии до *свободной поверхности*, получим *отрицательное* тело давления в виде криволинейной призмы с основанием *ВСМК*, так как оно построено на несмоченной поверхности и не заполнено жидкостью. Стрелки в эюре тела давления покажем пунктиром и направим *вверх*.

Анализ построения двух тел давления показывает, что в объёме *АКМС* два тела давления взаимно уничтожаются (сокращаются, компенсируются).

Результирующее тело давления *отрицательное* в виде полуцилиндра объёмом:

$$V_{\text{т.л.}} = \frac{\pi D^2}{8} L.$$

Вертикальная составляющая R_y :

$$R_y = \rho g \frac{\pi D^2}{8} L; \quad R_y = 10^3 \cdot 9,8 \frac{3,14 \cdot 0,6^2}{8} \cdot 2,0 = 2,77 \cdot 10^3 \text{ Н} = 2,77 \text{ кН}.$$

Показываем линию действия и точку приложения R_y . Вертикальная составляющая приложена в *центре тяжести* тела давления и направлена *вверх*. Центр тяжести полуцилиндра (см. приложение, табл. 3) находится на расстоянии $x_c \approx 4r/3\pi = 0,13$ м от оси цилиндра.

Показываем на чертеже (см. рис. 3.4, б) расстояние x_c , центр тяжести полуцилиндра и направление силы R_y .

4. Определяем величину равнодействующей давления воды на цилиндрический затвор:

$$R = \sqrt{5,88^2 + 2,77^2} = 6,5 \text{ кН}.$$

Чтобы найти линию действия, направление и точку приложения равнодействующей R , по линии действия продолжим R_x и R_y до взаимного пересечения, получим точку N . Геометрическое сложение сил проведём вне чертежа. Вынесем точку N и покажем сложение сил в масштабе.

Параллельно по линии действия силу R перенесём в точку N на основном чертеже и продолжим её до пересечения с криволинейной поверхностью. Равнодействующая R должна пройти через точку пересечения составляющих и центр криволинейной поверхности.

Точка пересечения равнодействующей с цилиндрической поверхностью является *центром давления*.

Угол α наклона равнодействующей R найдём через $\text{tg } \alpha$:

$$\text{tg } \alpha = \frac{R_y}{R_x} = \frac{2,77}{5,88} = 0,47; \quad \alpha = 25^\circ.$$

Ответ: равнодействующая давления воды $R = 6,5$ кН направлена радиально под углом $\alpha = 25^\circ$.

В практике решения задач могут быть случаи определения силы давления на криволинейную поверхность, когда жидкость действует с двух сторон. Такое решение рассмотрим на примере задачи 3.2.2.

Задача 3.2.2. Определить силу давления нефти на цилиндрическую поверхность AB , а также угол наклона силы к горизонту, если слева уровень нефти $H_1 = D = 1,2$ м, справа $H_2 = D/2 = 0,6$ м. Длина цилиндрической поверхности $L = 4,0$ м. Принять плотность нефти $\rho_n = 900$ кг/м³ (рис. 3.5).

Решение. На рис. 3.5,а представлен общий вид цилиндрической поверхности длиной L , воспринимающей давление нефти с двух сторон.

В случае действия жидкости с двух сторон целесообразно определить составляющую R_x , как геометрическую сумму горизонтальных сил слева R_{x1} и справа R_{x2} , и вертикальную составляющую R_y через объём результирующего тела давления, затем геометрически сложить R_x и R_y и получить результирующую силу давления R и её положение.

Рассчитать силу давления жидкости на криволинейную поверхность сначала слева, затем справа, геометрически сложить эти составляющие для определения равнодействующей и её положения более трудоёмко, как аналитически, так и геометрически.

1. Покажем два направления - x и y (см. рис. 3.5,б), по которым определим составляющие силы давления с последующим их геометрическим сложением:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}.$$

2. Определим величину и положение горизонтальной составляющей R_x .

Расчёт проведём *графо-аналитическим* методом:

а) Определим силу давления нефти слева R_{x1} .

Криволинейную поверхность AB спроектируем внутрь жидкости на вертикальную плоскость и получим вертикальную проекцию $A'B'$ в виде прямоугольника высотой H_1 и длиной (шириной) L (см. рис. 3.5,б).

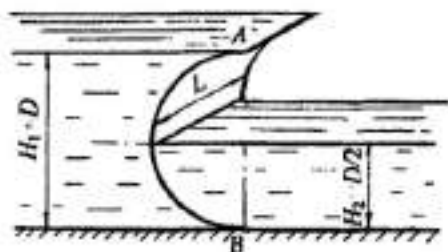
Давление нефти в точках A' и B' :

$$p_A = 0; \quad p_B = \rho_n g H_1. \quad p_B = 900 \cdot 9,8 \cdot 1,2 = 10,6 \cdot 10^3 \text{ Па} = 10,6 \text{ кПа}.$$

Строим эпюру давления. Откладываем по нормали к вертикальной проекции величину давления в характерных точках в удобном масштабе, соединяем полученные точки наклонной прямой. Эпюра давления представляет треугольную призму с основанием в виде треугольника и

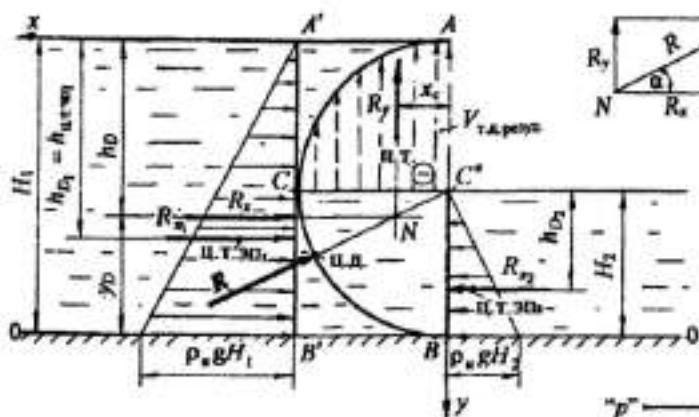
высотой, равной L . Заперикуываем эяору, стрелками показываем направление давления нефти слева направо (см. рис. 3.5,б)

а



б

"R" — 1 : 10 кН



в

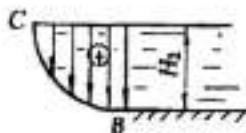
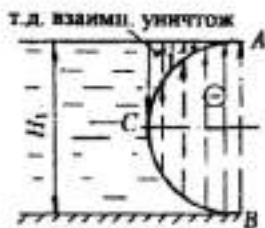


Рис. 3.5

Силу R_{x_1} рассчитаем по формуле (2.11):

$$R_{x_1} = S_{x_1} L = \frac{\rho_n g H_1^2}{2} L; \quad R_{x_1} = \frac{900 \cdot 9,8 \cdot 1,2^2}{2} \cdot 4,0 = 25,4 \cdot 10^3 \text{ Н} = 25,4 \text{ кН.}$$

Покажем линию действия силы R_{x_1} . Сила проходит через центр тяжести эпюры, т. е. через центр тяжести треугольника (см. формулу (2.11)). Глубина погружения центра давления для силы R_{x_1} :

$$h_{D_1} = h_{ц.т.эп_1} = \frac{2}{3} H_1.$$

На чертеже (см. рис. 3.5,б) покажем h_{D_1} и линию действия силы R_{x_1} .

Сила направлена по нормали к вертикальной проекции $A'B'$ слева направо (из жидкости на вертикальную проекцию).

б) Определим силу давления нефти справа R_{x_2} .

Криволинейную поверхность CB спроектируем внутрь жидкости на вертикальную плоскость, получим вертикальную проекцию $C'B$ в виде прямоугольника высотой H_2 и длиной L .

Рассчитаем силу R_{x_2} . Давление в характерных точках:

$$p_{C'} = 0; \quad p_B = \rho_n g H_2. \quad p_B = 900 \cdot 9,8 \cdot 0,6 = 5,3 \cdot 10^3 \text{ Па} = 5,3 \text{ кПа.}$$

По аналогии строим эпюру давления нефти справа. Эпюра давления в вертикальной плоскости также представляет равномерную нагрузку в виде треугольника. Стрелками покажем направление действия нефти на вертикальную проекцию справа налево. Рассчитаем силу R_{x_2} :

$$R_{x_2} = S_{x_2} L = \frac{\rho_n g H_2^2}{2} L; \quad R_{x_2} = \frac{900 \cdot 9,8 \cdot 0,6^2}{2} \cdot 4,0 = 6,35 \cdot 10^3 \text{ Н} = 6,35 \text{ кН.}$$

Покажем линию действия силы R_{x_2} . Сила проходит через центр тяжести второй эпюры на глубине $h_{D_2} = h_{ц.т.эп_2} = 2/3 H_2$ и направлена по нормали к вертикальной проекции $C'B$ справа налево (см. рис. 3.5, б).

в) Определим горизонтальную составляющую R_x путём геометрического сложения составляющих R_{x_1} и R_{x_2} :

$$\vec{R}_x = \vec{R}_{x_1} + \vec{R}_{x_2};$$

$$R_x = R_{x_1} - R_{x_2}; \quad R_x = 19,05 \text{ кН.}$$

Положение силы R_x определим, пользуясь теоремой Вариньона: момент от равнодействующей R_x равен сумме моментов составляющих сил R_{x1} и R_{x2} относительно той же оси, например 0-0, совмещённой с дном. Обозначим через y_D расстояние от оси 0-0, на котором приложена сила R_x :

$$R_x y_D = R_{x1} \cdot 1/3 H_1 - R_{x2} \cdot 1/3 H_2; \text{ отсюда } y_D = 0,47 \text{ м.}$$

На расстоянии y_D от дна покажем линию действия и точку приложения горизонтальной силы R_x (см. рис. 3.5,6). Глубина погружения центра давления для горизонтальной составляющей $h_D = H_1 - y_D = 1,2 - 0,47 = 0,73$ м. Сила R_x направлена по нормали слева направо на вертикальную проекцию $A'B'$ криволинейной поверхности.

3. Определим *величину, направление и точку приложения* вертикальной составляющей R_y . Согласно формуле (3.5):

$$R_y = \rho g V_{\tau,2}$$

Найдём положение результирующего тела давления. На рис. 3.5,в представлено построение тела давления для левой и правой части криволинейной поверхности согласно принятой методике (см. глава 3; 3.1).

Для левой части получаем *отрицательное* тело давления объёмом в виде полуцилиндра:

$$V_{\tau,2,1} = \frac{\pi H_1^2}{8} L.$$

Для правой части тело давления *положительное* объёмом в виде четверти цилиндра:

$$V_{\tau,2,2} = \frac{\pi H_2^2}{4} L.$$

При геометрическом сложении объёмов двух тел давления положительного и отрицательного, т. е. при наложении объёмов тела давления, получим *резльтирующее тело давления отрицательное* в виде четверти цилиндра (см. рис. 3.5,6). Вертикальная составляющая R_y :

$$R_y = \rho_s g V_{\tau,2,резул.} = \rho_s g \frac{\pi H_1^2}{16} L; \quad R_y = 9,97 \text{ кН.}$$

Из центра тяжести результирующего тела давления, т. е. из центра тяжести четверти цилиндра, вертикальная составляющая R_y *направлена*

верх. Центр тяжести четверти цилиндра так же, как центр тяжести полуцилиндра, находится на расстоянии $x_c = 4r/3\pi$ (см. приложение, табл. 3):

$$x_c = \frac{4H_2}{3\pi}; \quad x_c = \frac{4 \cdot 0,6}{3 \cdot 3,14} = 0,25 \text{ м.}$$

На рис. 3.5,б покажем x_c и положение вертикальной составляющей R_y .

4. Находим величину равнодействующей R :

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}; \quad R = \sqrt{19,05^2 + 9,97^2} = 21,5 \text{ кН.}$$

Чтобы найти положение и точку приложения равнодействующей сил давления нефти R , продолжим составляющие R_x и R_y до взаимного пересечения, получим точку N (см. рис. 3.5,б). Вынесем точку N вне чертежа и проведём геометрическое сложение сил.

По линии действия равнодействующую R параллельно перенесём в точку пересечения составляющих на основном чертеже и найдём точку пересечения силы R с криволинейной поверхностью. Эта точка является центром давления для результирующей сил давления нефти.

Равнодействующая R должна быть направлена радиально к криволинейной поверхности. Проверим, действительно сила R проходит через центр цилиндрической поверхности, построение верно.

Угол α наклона равнодействующей найдём через $\text{tg } \alpha$:

$$\text{tg } \alpha = \frac{R_y}{R_x} = \frac{9,97}{19,05} = 0,523; \quad \alpha = 27^\circ 40'.$$

Ответ: сила давления нефти на цилиндрическую поверхность $R = 21,5 \text{ кН}$, сила действует радиально под углом $\alpha = 27^\circ 40'$.

В задачах 3.2.1 и 3.2.2 представлены аналитический и графо-аналитический методы определения горизонтальной составляющей силы давления жидкости на криволинейную поверхность, расчёт вертикальной составляющей через объём результирующего тела давления. В этих задачах объём тела давления представлен простыми геометрическими фигурами, положение центра тяжести которых определяется по таблице.

Наряду с простыми геометрическими фигурами тела давления при решении задач могут быть случаи, когда тело давления представляет криволинейную призму с основанием, состоящим из нескольких геометрических фигур.

На примере решения задачи 3.2.3 рассмотрим определение положения центра тяжести тела давления, как сложной геометрической фигуры.

Задача 3.2.3. Определить силу давления воды на четверть цилиндрической поверхности AB открытого резервуара, угол наклона силы к горизонту и глубину погружения центра давления, если глубина заполнения резервуара $H = 1,6$ м, радиус цилиндрической поверхности $r = 0,8$ м, длина резервуара $L = 5,0$ м (рис. 3.6).

Решение. На рис. 3.6,а дан общий вид резервуара с цилиндрической поверхностью в изометрии. На рис. 3.6,б представлено среднее сечение резервуара нормальной плоскостью в соответствующем *масштабе*.

Согласно принятой *методике*, проводим следующие расчёты.

1. Выбираем направления x и y , по которым определяем составляющие силы давления с последующим их геометрическим сложением:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}.$$

Начало координат выбираем на свободной поверхности. Ось x направляем вправо по направлению действия жидкости, ось y - вертикально вниз.

2. Определяем горизонтальную составляющую R_x по формуле (3.3):

$$R_x = \rho g y_C A_y.$$

Спроектируем цилиндрическую поверхность AB на вертикальную плоскость. Получаем в проекции прямоугольник высотой $AB' = r$ и шириной, равной длине резервуара L . Площадь вертикальной проекции четверти цилиндра $A_y = rL$.

Находим координату (глубину погружения) центра тяжести вертикальной проекции y_C , которая отсчитывается от *свободной поверхности* жидкости:

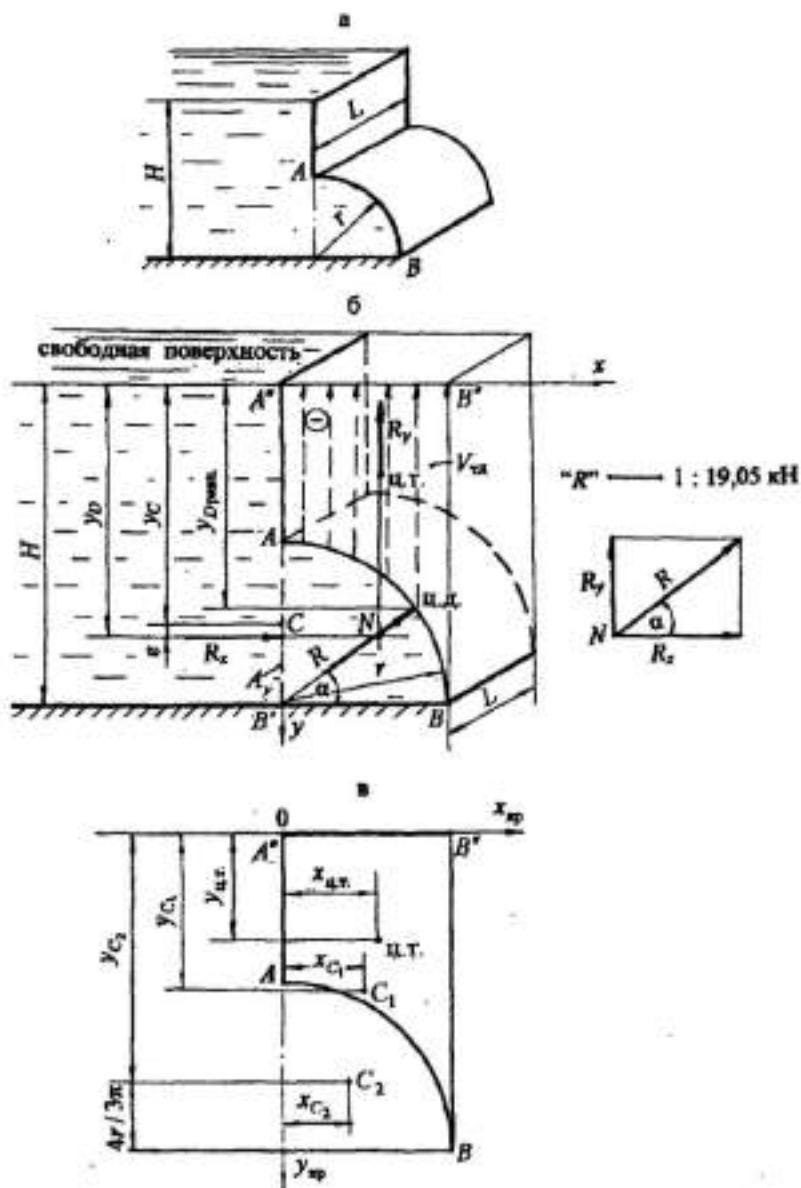
$$y_C = H - \frac{r}{2}.$$

Показываем y_C на чертеже (см. рис. 3.6,б).

Рассчитываем горизонтальную составляющую R_x :

$$R_x = \rho g \left(H - \frac{r}{2} \right) rL;$$

$$R_x = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 1,2 \cdot 0,8 \cdot 5,0 = 47,0 \cdot 10^3 \text{ Н} = 47,0 \text{ кН}.$$



Показываем направление и точку приложения силы R_x . Сила приложена в *центре давления* по нормали к вертикальной проекции AB' на глубине y_D . По формуле (3.4)

$$y_D = y_C + \frac{I_C}{y_C A_y},$$

где I_C – центральный момент инерции вертикальной проекции криволинейной поверхности относительно горизонтальной оси, т. е. момент инерции прямоугольника, согласно табл. 3 (см. приложение):

$$I_C = \frac{Lr^3}{12}.$$

Подставим значения всех параметров:

$$y_D = y_C + \frac{Lr^3}{12 y_C r L} = y_C + \frac{r^2}{12 y_C};$$

$$y_D = 1,2 + \frac{0,64}{12 \cdot 1,2} = 1,2 + 0,044 = 1,244 \text{ м.}$$

Эксцентриситет e , т. е. понижение центра давления относительно центра тяжести вертикальной проекции:

$$e = \frac{r^2}{12 y_C}; \quad e = 0,044 \text{ м} = 44 \text{ мм.}$$

На чертеже (см. рис. 3.6,б) показываем координату центра давления y_D , эксцентриситет e , направление и точку приложения силы R_x .

3. Определяем вертикальную составляющую R_y по формуле (3.5):

$$R_y = \rho g V_{\tau, д}$$

Вертикальная составляющая равна силе тяжести жидкости в объёме тела давления. Чтобы найти объём тела давления, построим эиору тела давления. Из контура цилиндрической поверхности проведём вертикальные линии до *продолжения свободной поверхности*. Тело давления ограничено самой криволинейной поверхностью AB , вертикальными проектирующими плоскостями и горизонтальной проекцией криволинейной поверхности AB на продолжение горизонта свободной поверхности.

Очерченное тело давления построено на несмоченной части криволинейной поверхности AB , не заполнено жидкостью, поэтому оно считается *отрицательным*. Стрелки в эпюре тела давления направлены вверх (сила R_y будет также направлена вверх). Тело давления представляет *криволинейную призму* с основанием $AA'B'B$ и высотой, равной L .

Площадь основания тела давления можно рассматривать как разность площадей двух фигур: прямоугольника $S_1 = S_{\text{прямо. } B'A'B'B}$ и четверти круга $S_2 = S_{1/4 \text{кр}}$. Тогда объём тела давления:

$$V_{\text{т.д.}} = (S_{\text{прямо. } B'A'B'B} - S_{1/4 \text{кр}})L = (rH - \frac{\pi r^2}{4})L.$$

Вертикальная составляющая R_y ,

$$R_y = \rho g (rH - \frac{\pi r^2}{4})L;$$

$$R_y = 10^3 \cdot 9,8 (0,8 \cdot 1,6 - \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{4}) \cdot 5,0 = 38,1 \cdot 10^3 \text{ Н} = 38,1 \text{ кН}.$$

Переходим к определению направления и точки приложения вертикальной составляющей R_y . Сила R_y из *центра тяжести тела давления* будет направлена *вверх*, так как тело давления *отрицательное*.

Нужно найти положение *центра тяжести* тела давления, т. е. центра тяжести основания тела давления.

Положение центра тяжести составной фигуры определим, пользуясь понятием статического момента площади. Согласно формулам, изучаемым в курсе сопротивления материалов, в данной задаче координаты центра тяжести сложной фигуры рассчитаем по формулам:

$$x_{\text{ц.т.}} = \frac{S_1 x_{G1} - S_2 x_{G2}}{S_1 - S_2}; \quad y_{\text{ц.т.}} = \frac{S_1 y_{G1} - S_2 y_{G2}}{S_1 - S_2},$$

где S_1 – площадь прямоугольника $B'A'B'B$;

S_2 – площадь четверти круга;

x_1 и x_2 ; y_1 и y_2 – координаты центров тяжести прямоугольника и четверти круга относительно временных осей $x_{\text{вр.}}$; $y_{\text{вр.}}$.

На рис. 3.6,в представлено основание тела давления $AA'B'B$. Временные оси $x_{\text{вр.}}$ и $y_{\text{вр.}}$ для удобства расчётов совпадают с направлением осей x и y на основном чертеже (см. рис. 3.6,б).

Для расчёта координат центра тяжести $x_{\text{ц.т.}}$ и $y_{\text{ц.т.}}$ фигуры $AA'B'B$ имеем:

$$S_1 = rH = 1,28 \text{ м}^3; \quad x_{C_1} = \frac{r}{2} = 0,4 \text{ м}; \quad y_{C_1} = \frac{H}{2} = 0,8 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{\pi r^2}{4} = 0,50 \text{ м}^3; \quad x_{C_2} = \frac{4r}{3\pi} = 0,34 \text{ м}; \quad y_{C_2} = H - \frac{4r}{3\pi} = 1,26 \text{ м};$$

$$x_{\text{ц.т.}} = \frac{1,28 \cdot 0,4 - 0,50 \cdot 0,34}{1,28 - 0,50} = \frac{0,342}{0,78} = 0,44 \text{ м};$$

$$y_{\text{ц.т.}} = \frac{1,28 \cdot 0,8 - 0,50 \cdot 1,26}{1,28 - 0,50} = 0,51 \text{ м}.$$

Откладываем значения координат центра тяжести тела давления $x_{\text{ц.т.}}$ и $y_{\text{ц.т.}}$ на рис. 3.6,в, показываем положение центра тяжести тела давления. В соответствующем масштабе переносим положение центра тяжести тела давления на основной чертёж и показываем линию действия и точку приложения вертикальной составляющей R_y . Как было указано выше, эта сила приложена в центре тяжести тела давления и направлена вертикально вверх.

4. Определяем величину равнодействующей сил давления воды R на цилиндрическую поверхность AB по формуле (3.2):

$$R = \sqrt{47,0^2 + 38,1^2} = 60,5 \text{ кН}.$$

Находим положение силы R . Геометрически сложим составляющие силы R_x и R_y : продолжим силы по линии действия до взаимного пересечения, получим точку N , через которую пройдёт равнодействующая R .

Для удобства построения точку N вынесем за пределы чертежа и покажем сложение сил. Чтобы найти положение центра давления для равнодействующей R , силу R по линии действия параллельно перенесём в точку N на основной чертёж (см. рис. 3.6,б) и продолжим её до пересечения с криволинейной поверхностью AB . Итак, центр давления – это точка пересечения линии действия силы R с цилиндрической поверхностью AB .

Равнодействующая R должна быть направлена радиально и проходить через точку N пересечения составляющих R_x и R_y , так как сила давления всегда действует по нормали или радиально к поверхности. Проверим построение в масштабе. Построение верно.

Определим угол α наклона равнодействующей к горизонту через $\text{tg } \alpha$:

$$\text{tg } \alpha = \frac{R_y}{R_x} = 0,81; \quad \alpha = 39^\circ.$$

Глубину погружения центра давления для равнодействующей R рассчитаем по формуле:

$$y_{D_{\text{равн}}} = H - r \sin 39^\circ; \quad y_{D_{\text{равн}}} = 1,6 - 0,8 \cdot 0,63 = 1,1 \text{ м.}$$

Показываем глубину погружения центра давления для равнодействующей ($y_{D_{\text{равн}}}$) на основном чертеже (см. рис. 3.6,б).

Ответ: сила давления воды на цилиндрическую поверхность $R = 60,5 \text{ кН}$ радиально направлена под углом $\alpha = 39^\circ$, приложена на глубине $y_{D_{\text{равн}}} = 1,1 \text{ м.}$

При решении задач по определению силы давления жидкости на криволинейную поверхность могут быть случаи расчёта объёма тела давления в виде криволинейной призмы, основанием которой является криволинейный треугольник, сегмент, полусегмент и им подобные. На рис. 3.7 представлены некоторые геометрические фигуры и показано положение их центров тяжести.

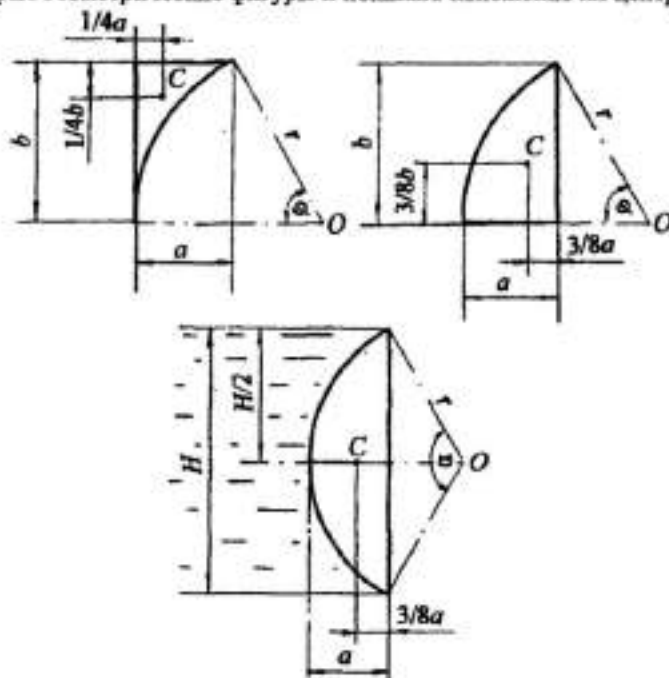


Рис. 3.7

Рассмотрим ещё один типовой случай определения силы давления жидкости на криволинейную поверхность в виде полусферы на примере решения задачи 3.2.4.

Задача 3.2.4. Определить силу давления бензина на полусферическую крышку закрытого резервуара. На поверхности бензина действует избыточное давление паров бензина $p_{\text{изб}} = 0,03$ ат. Крышка перекрывает круглое донное отверстие радиусом $r = 0,3$ м. Глубина заполнения резервуара $H = 0,9$ м. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бен}} = 750 \text{ кг/м}^3$ (рис. 3.8).

Решение. На рис. 3.8,а представлен общий вид резервуара с бензином в вертикальном разрезе.

Прежде чем приступать к решению задачи, следует определиться с методикой учёта избыточного давления на поверхности при расчёте силы давления на полусферическую поверхность. Здесь могут быть выбраны два варианта.

Во-первых, рассчитывать отдельно составляющую силу от внешнего, манометрического давления, а затем суммировать её с силой давления жидкости и находить равнодействующую сил давления.

Во-вторых, манометрическое давление на поверхности жидкости можно перевести в давление столба бензина, условно заменив манометр пьезометром, найти пьезометрическую высоту и положение *условной свободной поверхности*.

Такая методика расчёта рассмотрена в главе 2, в задачах 2.3.6; 2.3.7; 2.3.8. Эта методика расчёта позволит сразу определить равнодействующую сил давления жидкости и манометрического давления.

Выберем второй вариант решения. Рассчитаем пьезометрический напор по показанию манометра, пользуясь формулой (1.5):

$$h_{p \text{ бен}} = \frac{p_{\text{изб}}}{\rho_{\text{бен}} g}; \quad h_{p \text{ бен}} = \frac{0,03 \cdot 98 \cdot 10^3}{750 \cdot 9,8} = 0,4 \text{ м.}$$

На уровне свободной поверхности в резервуаре (см. рис. 3.8,б) пунктиром покажем пьезометр, высота столба жидкости в котором соответствует $h_{p \text{ бен}}$. По уровню жидкости в пьезометре покажем *условную свободную поверхность*, от которой будем отсчитывать координаты центров тяжести фигур и центра давления.

Дальнейший расчёт силы давления бензина на полусферическую поверхность проводим по принятой *методике*:

1. Выберем два направления - x и y (рис. 3.8,б), по которым определим составляющие силы давления с последующим их геометрическим сложением.

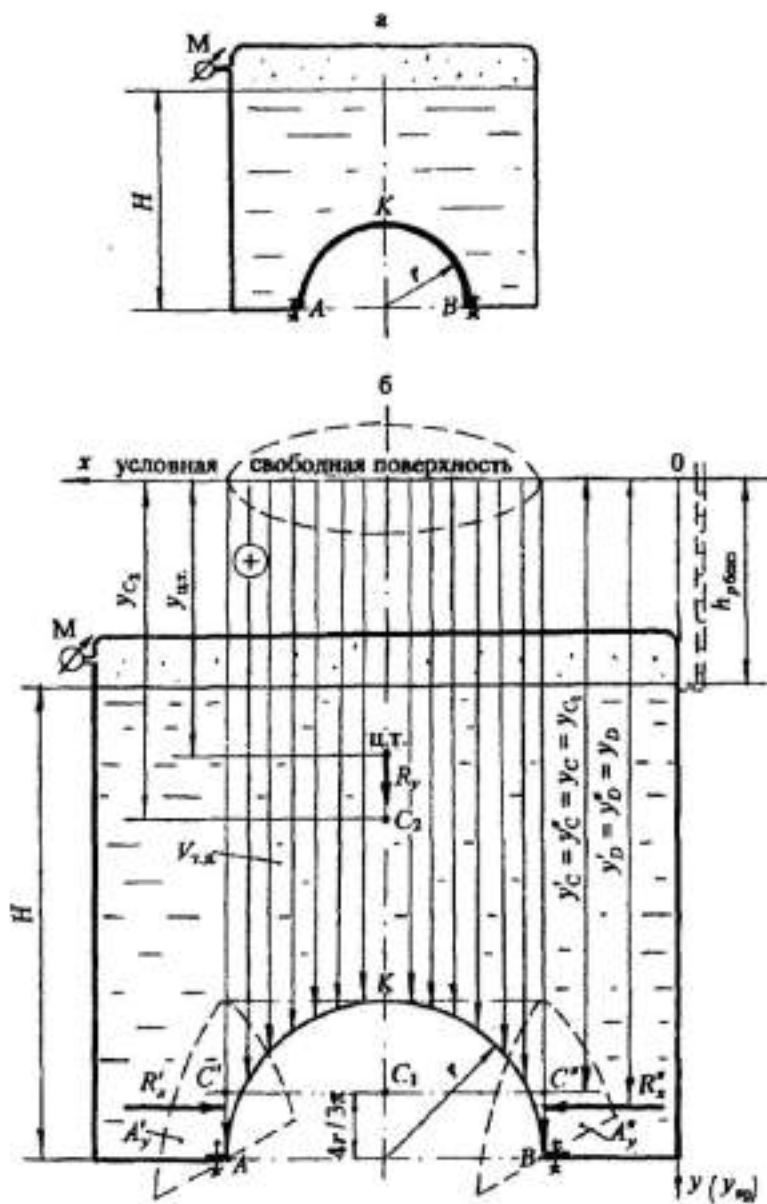


Рис. 3.8

2. Определим *горизонтальную* составляющую R_x по формуле (3.3):

$$R_x = \rho_{\text{бенз}} g y_C A_y.$$

Полусферическая поверхность AKB имеет две части: AK , на которую бензин действует слева, и KB с действием бензина справа.

Чтобы определить горизонтальную силу на левую часть полусферы, спроектируем часть AK *внутрь* жидкости на вертикальную плоскость. В проекции получим полуокруг площадью $A'_y = \frac{\pi r^2}{2}$. Проекция показана пунктирными линиями.

Затем спроектируем правую часть полусферы *внутрь* жидкости и получим точно такую же проекцию в виде полуокруга площадью $A''_y = \frac{\pi r^2}{2}$.

Находим координаты центров тяжести этих проекций:

$$y'_C = y''_C = y_C = H + h_{\text{бенз}} - \frac{4r}{3\pi}.$$

Покажем координаты центров тяжести проекций на чертеже (см. рис. 3.8,б).

Получим формулы для горизонтальных сил слева и справа:

$$R'_x = \rho_{\text{бенз}} g y'_C A'_y;$$

$$R''_x = \rho_{\text{бенз}} g y''_C A''_y.$$

Силы R'_x и R''_x равны по величине, но противоположно направлены. Поскольку равны координаты центров тяжести проекций, то равны и координаты центров давления слева и справа:

$$y'_D = y''_D = y_D.$$

На глубине y_D покажем силы R'_x и R''_x противоположно направленными. Таким образом, при геометрическом сложении сил R'_x и R''_x получим:

$$\bar{R}_x = \bar{R}'_x + \bar{R}''_x; \quad R_x = 0.$$

Горизонтальная составляющая силы давления жидкости на полусферическую поверхность равна нулю.

3. Определим вертикальную составляющую силы давления на полусферическую поверхность R_y по формуле (3.5):

$$R_y = \rho_{\text{бенз}} g V_{\text{т.д.}}$$

Чтобы построить тело давления, из контура полусферы проведём вертикальные линии до *условной свободной поверхности*. Получим эспору тела давления. Тело давления построено на смоченной части полусферы, заполнено жидкостью, значит, оно действительное, или положительное. Стрелками, направленными вниз, покажем действие бензина на полусферическую крышку (сила R_y также будет направлена вниз).

Горизонтальная проекция полусферы на условную свободную поверхность представляет круг.

Таким образом, объём тела давления – это объём цилиндра высотой $(H + h_{p\text{бенз}})$, за вычетом объёма полусферы:

$$V_{\text{т.д.}} = V_{\text{цил.}} - V_{\text{полусф.}}$$

$$V_{\text{т.д.}} = \pi r^2 (H + h_{p\text{бенз}}) - \frac{4\pi r^3}{3 \cdot 2} = \pi r^2 (H + h_{p\text{бенз}} - \frac{2}{3}r).$$

Вертикальная составляющая R_y :

$$R_y = \rho_{\text{бенз}} g \pi r^2 (H + h_{p\text{бенз}} - \frac{2}{3}r);$$

$$R_y = 750 \cdot 9,8 \cdot 3,14 \cdot 0,09 \cdot 1,1 = 2284,8 \text{ Н} = 2,29 \text{ кН}.$$

Следует показать *линию действия и точку приложения* вертикальной силы R_y . Линия действия силы совпадает с геометрической осью полусферической поверхности и цилиндра. Необязательно находить точку приложения силы R_y , т. е. центр тяжести тела давления, в котором она приложена, так как силу по линии действия можно перемещать. Но по правилам методики расчёта определим положение центра тяжести тела давления. Нужно определить только координату центра тяжести тела давления - $y_{\text{ц.т.}}$ (см. задачу 3.2.3).

Временную ось $y_{\text{вр.}}$ совместим с осью y , тогда

$$y_{\text{ц.т.}} = \frac{S_2 y_{C_2} - S_1 y_{C_1}}{S_2 - S_1},$$

где $S_1 = \frac{\pi r^2}{2}$ - площадь полукруга (вертикальное сечение полусферы);
 $S_2 = 2r(H + h_{p\text{век}})$ - площадь прямоугольника;
 $y_{C_1} = (H + h_{p\text{век}}) - \frac{4r}{3\pi}$ - координата центра тяжести C_1 полукруга;
 $y_{C_2} = \frac{H + h_{p\text{век}}}{2}$ - координата центра тяжести C_2 прямоугольника.

Для расчётов: $S_1 = 0,14 \text{ м}^2$; $S_2 = 0,78 \text{ м}^2$; $y_{C_1} = 1,17 \text{ м}$; $y_{C_2} = 0,65 \text{ м}$.

Получим $y_{\text{вл.}} = 0,54 \text{ м}$. Покажем на чертеже $y_{\text{вл.}}$ и положение центра тяжести тела давления.

Из центра тяжести тела давления вертикальную силу R_y направим *вниз*. Поскольку горизонтальная сила равна нулю, на полусферическую поверхность действует только вертикальная сила.

Ответ: на полусферическую крышку резервуара по оси полусферы действует сила $R = R_y = 2,29 \text{ кН}$.

В задаче 3.2.4 представлен случай, когда на поверхности жидкости закрытого резервуара действует манометрическое давление. В практике расчётов силы давления на криволинейную поверхность может быть условие, когда на поверхности жидкости или на определённом уровне в закрытом резервуаре известно вакуумметрическое давление ($p_{\text{вак}}$). В этом случае методика расчёта силы давления не меняется.

При определении горизонтальной составляющей можно воспользоваться принципом расчёта силы давления, изложенным в задаче 2.3.9.

При определении вертикальной силы следует помнить, что вертикальная составляющая от вакуумметрического давления отрицательная и направлена вверх.

По аналогии с манометрическим давлением можно найти вакуумметрический напор $h_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g}$, который учитывается со знаком *минус*,

поэтому объём тела давления будет отрицательным, значит, и *вертикальная составляющая силы от вакуумметрического давления отрицательная, направленная вверх*.

В представленных примерах решения задач рассмотрены различные случаи действия жидкости на криволинейные поверхности. Предлагается проверить свои знания и умение пользоваться методикой расчёта силы давления на криволинейные поверхности при решении задач для самостоятельной работы.

3.3. Задачи для самостоятельной работы по теме "Сила давления жидкости на криволинейные поверхности"

Задача 3.3.1

Определить величину и угол наклона силы давления бензина на полусферическую крышку закрытого резервуара (рис. 3.9), если радиус полусферы $r = 0,2$ м, показание пьезометра, выведенного на уровне нижней кромки крышки $H = 0,8$ м, плотность бензина $\rho_{\text{бен}} = 800 \text{ кг/м}^3$.

Ответ: сила давления бензина $R = 605,2 \text{ Н}$, угол наклона силы к горизонту $\alpha = 12^\circ$; глубина погружения центра давления $y_{D_{\text{равн}}} = 0,643 \text{ м}$.

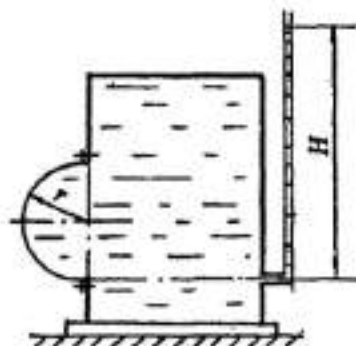


Рис. 3.9

Задача 3.3.2

Определить силу давления масла на цилиндрическую стенку резервуара AB (рис. 3.10), угол наклона силы и глубину погружения центра давления, если глубина заполнения резервуара $H = 0,8$ м; радиус цилиндрической части $r = 0,6$ м; секторный угол равен 90° ; длина образующей цилиндрической поверхности $L = 1,2$ м. Принять плотность масла $\rho_{\text{масл}} = 860 \text{ кг/м}^3$.

Ответ: сила давления масла $R = 3,64 \text{ кН}$; угол наклона силы к горизонту $\alpha = 33^\circ$; глубина погружения центра давления $y_{D_{\text{равн}}} = 0,47 \text{ м}$.

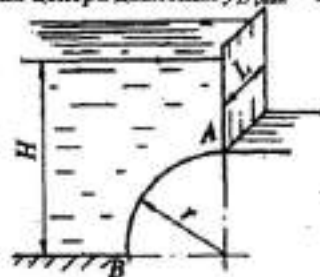


Рис. 3.10

Задача 3.3.3

Определить величину, угол наклона и глубину центра давления для равнодействующей давления воды на криволинейную стенку AB (рис. 3.11) длиной $L = 10$ м. Действующий напор $H = 4,0$ м. Криволинейная стенка представляет часть цилиндрической поверхности с секторным углом $\varphi = 60^\circ$.

Ответ: равнодействующая сила давления воды $R = 1013$ кН; угол наклона силы к горизонту $\alpha = 39^\circ$; глубина центра давления $y_{0\text{рав.}} = 2,93$ м.

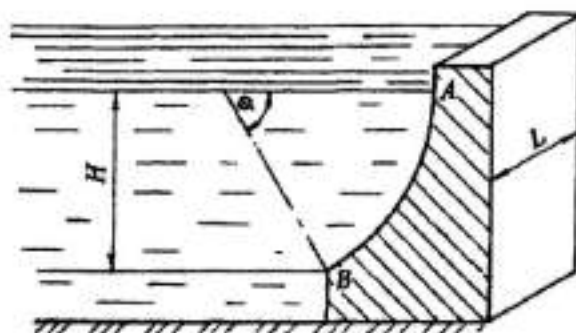


Рис. 3.11

Задача 3.3.4

Определить величину и угол наклона к горизонту равнодействующей давления воды на криволинейную стенку AB резервуара (рис. 3.12), если ширина резервуара $B = 3,0$ м, напоры воды соответственно $H_1 = 2,0$ м, $H_2 = 1,0$ м.

Ответ: равнодействующая давления воды $R = 155,6$ кН; угол наклона силы к горизонту $\alpha = 31^\circ$.

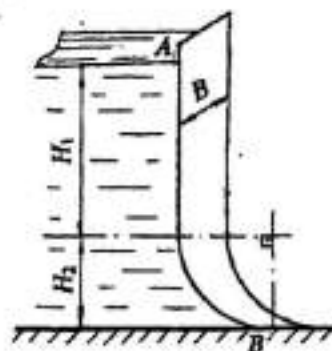


Рис. 3.12

Задача 3.3.5

Определить величину, угол наклона к горизонту и глубину центра давления для силы давления воды на секторный затвор AB (рис. 3.13), удерживающий напор $H = 1,5$ м, если ширина затвора $B = 2,0$ м, секторный угол затвора $\varphi = 60^\circ$.

Ответ: равнодействующая давления воды $R = 28,5$ кН; угол наклона силы к горизонту $\alpha = 39^\circ$; глубина центра давления $y_{D_{\text{равн.}}} = 1,1$ м.

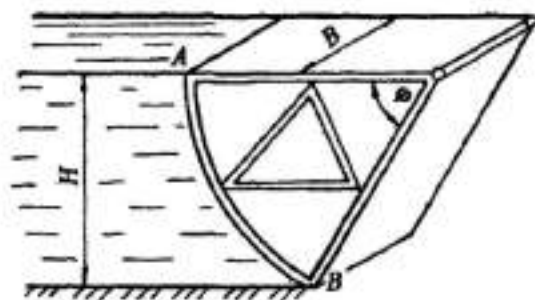


Рис. 3.13

Задача 3.3.6

Определить величину, угол наклона к горизонту и глубину центра давления для силы давления воды на криволинейную стенку AB (рис. 3.14) длиной $L = 3,0$ м, удерживающую напор $H = 1,5$ м. Криволинейная стенка представляет часть цилиндрической поверхности с секторным углом $\varphi = 60^\circ$.

Ответ: равнодействующая сила давления воды $R = 35,0$ кН; угол наклона силы к горизонту $\alpha = 18^\circ$; глубина центра давления $y_{D_{\text{равн.}}} = 0,95$ м.

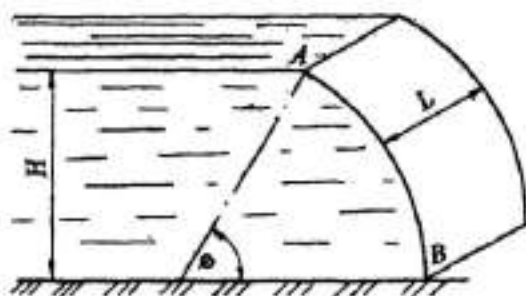


Рис. 3.14

Задача 3.3.7

Определить силу давления бензина на полусферическое дно цилиндрического резервуара (рис. 3.15) радиусом $r = 0,4$ м, если показание манометра, установленного на расстоянии $h = 0,8$ м от дна резервуара, $p_{\text{ман}} = 0,12$ ат. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720$ кг/м³.

Ответ: сила давления бензина $R = 7,81$ кН.

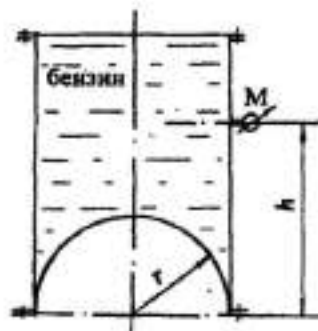


Рис. 3.15

Задача 3.3.8

Определить усилие F , которое нужно приложить к полусферической крышке резервуара с водой (рис. 3.16) для удержания её в закрытом положении, если радиус полусферы $r = 0,2$ м. Крышка поворачивается вокруг шарнира в точке A . Показание пьезометра, установленного на уровне шпигера, $h = 0,6$ м.

Ответ: усилие $F \geq 287$ Н.

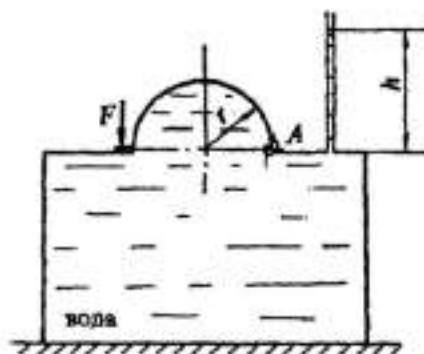


Рис. 3.16

Задача 3.3.9

Определить равнодействующую сил давления воды, угол наклона её к горизонту и глубину погружения центра давления для цилиндрической поверхности AB с секторным углом $\varphi = 120^\circ$. Длина поверхности $L = 3,0$ м. Действующий напор воды слева $H = 1,5$ м, справа $h = H/2 = 0,75$ м (рис. 3.17). При решении представить чертёж в виде вертикального сечения криволинейной поверхности.

Ответ: равнодействующая сил давления воды $R = 25,73$ кН действует под углом $\alpha = 15^\circ$ к горизонту, глубина погружения центра давления $y_{D \text{ рис.}} = 0,98$ м.

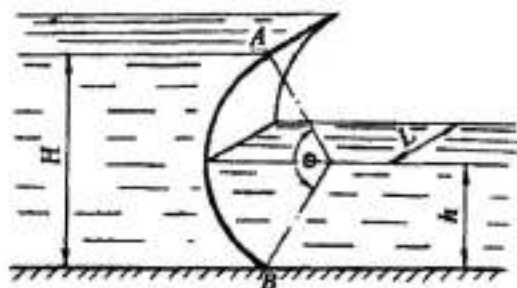


Рис. 3.17

Задача 3.3.10

Определить величину и угол наклона к горизонту равнодействующей сил давления воды на устройство в виде цилиндрического затвора (рис. 3.18), если диаметр цилиндра $D = 0,9$ м, действующий напор слева $H = 1,2$ м, справа $h = D/2$. Длина цилиндрического затвора $L = 4,0$ м.

Ответ: равнодействующая сил давления воды $R = 29,24$ кН действует под углом $\alpha = 39^\circ$ к горизонту.

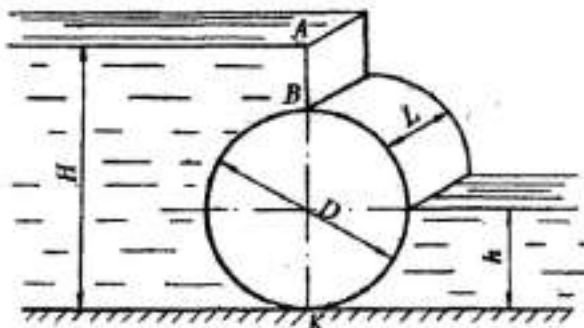


Рис. 3.18

Задача 3.3.11

В закрытом резервуаре, заполненном бензином, в боковой стенке сделано круглое отверстие, которое закрывается полусферической крышкой радиусом $r = 0,6$ м (рис. 3.19). Крышка укреплена с помощью шарнира в точке A . На расстоянии $h = 1,2$ м от шарнира на свободной поверхности бензина действует вакуумметрическое давление $p_{\text{вак}} = 0,05$ ат. Определить усилие F для удержания крышки в закрытом положении. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 710 \text{ кг/м}^3$.

Ответ: усилие для удержания крышки $F \geq 4,25 \text{ кН}$.

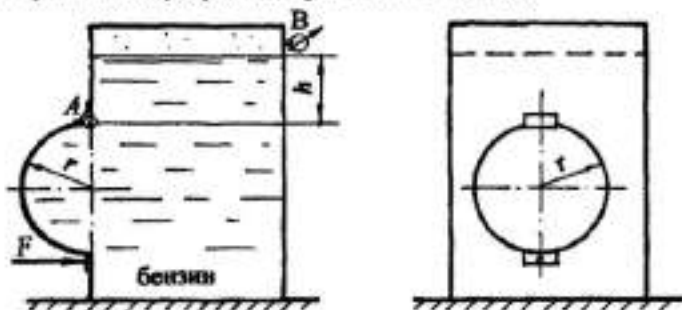


Рис. 3.19

Задача 3.3.12

Закрытый резервуар с полуцилиндрическим дном радиусом $r = 0,6$ м и длиной $L = 1,5$ м заполнен маслом плотностью $\rho_{\text{масл}} = 900 \text{ кг/м}^3$ (рис. 3.20). Сила давления масла на дно резервуара $R = 15,4 \text{ кН}$. Определить на какой высоте H от оси цилиндрической части установлен вакуумметр, показание которого $p_{\text{вак}} = 0,063$ ат.

Ответ: высота установки вакуумметра $H = 1,2$ м.

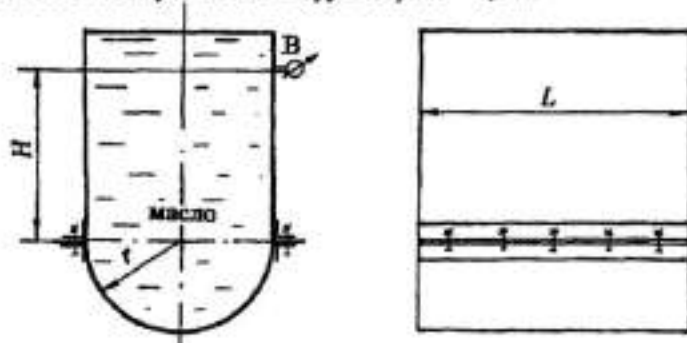


Рис. 3.20

Задача 3.3.13

Определить силу давления воды на верхнюю и нижнюю половины сферического резервуара радиусом $r = 0,3$ м, полностью заполненного водой, а также растягивающее усилие в болтах фланцевого соединения (6 болтов), если показание манометра, установленного под углом $\alpha = 45^\circ$ в нижней части резервуара $p_{\text{ман}} = 0,1$ ат. (рис. 3.21).

Ответ: $R_{\text{верх}} = 1,63$ кН; $R_{\text{ниж}} = 2,74$ кН; $R_{\text{болт}} = 0,73$ кН.

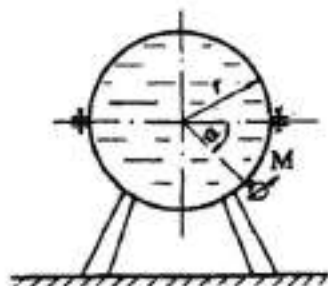


Рис. 3.21

Задача 3.3.14

Определить величину равнодействующей давления воды на полуцилиндрическую крышку AB закрытого резервуара и угол наклона силы к горизонту. Диаметр цилиндрической части $D = 600$ мм, длина образующей цилиндрической поверхности $L = 800$ мм, показание манометра, установленного на расстоянии $h = 100$ мм от дна резервуара, $p_{\text{ман}} = 0,07$ ат (рис. 3.22). Рассчитать растягивающее и сдвигающее усилие, воспринимаемое болтами крышки.

Ответ: равнодействующая $R = 2,6$ кН, угол наклона силы к горизонту $\alpha = 25^\circ$; $R_{\text{раст.}} = 2,35$ кН; $R_{\text{сдв.}} = 1,12$ кН.

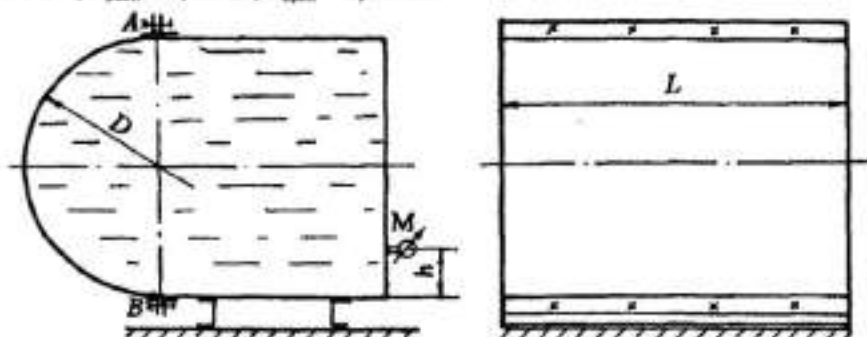


Рис. 3.22

ГИДРОДИНАМИКА

Гидродинамика — раздел гидромеханики, в котором изучаются законы движения жидкости, взаимодействие жидкости с твёрдыми поверхностями и движущимися твёрдыми телами.

Раздел гидродинамики является основой для решения теоретических и инженерных задач по расчёту трубопроводных систем, открытых русел, истечения жидкости через отверстия и насадки.

Глава 4

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ.
РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

4.1. Основные понятия о параметрах движения жидкости

К гидродинамическим характеристикам потока относятся: *давление, скорость и ускорение*, т. е. изменение скорости во времени.

При установившемся движении жидкости распределение давления по сечению движущегося потока подчиняется гидростатическому закону, т. е. давление не является функцией времени.

Что касается скорости, то она изменяется во времени и в пространстве. Математически такую зависимость трудно записать, поэтому гидродинамические законы имеют достаточно общий характер с некоторыми допущениями.

Скорость в точке потока или скорость в сечении элементарной струйки (понятие струйки будет приведено ниже) обозначается буквой u . Средняя скорость потока обозначается — u .

В зависимости от того, являются ли основные параметры движения функцией времени, различают два вида движения жидкости: *неустановившееся и установившееся*.

Неустановившееся — это движение жидкости, при котором скорость является функцией времени. В качестве примера неустановившегося движения можно привести истечение жидкости при переменном напоре (опорожнение резервуара).

Установившееся — это движение жидкости, при котором все параметры движения в одной и той же точке пространства не меняются во времени, т. е. приращение скорости во времени (ускорение) равно нулю.

В зависимости от характера изменения скорости по длине пространства, заполненного жидкостью, установившееся движение может быть:

а) *равномерным*, при котором скорость по длине струйки, потока остаётся постоянной (движение в трубах постоянного диаметра);

б) *неравномерным*, если скорость по длине потока резко изменяется по величине или (и) по направлению (внезапное сужение или расширение потока, резкий поворот и другие);

в) *плавно изменяющимся*, если изменение скорости происходит достаточно плавно (конические переходники сужающиеся и расширяющиеся). В этом случае с достаточной для практики точностью применимы законы равномерного движения.

В программу данного курса входит изучение законов *установившегося* движения и применение этих законов для решения инженерных задач.

4.2. Понятие идеальной жидкости и потока жидкости

В разделе "Общие сведения о жидкостях" рассмотрены физические свойства жидкостей. В разделе "Гидродинамика" при выводе законов движения необходимо учитывать плотность, удельный вес и все физические свойства жидкостей. Учесть влияние всех этих параметров на условия движения жидкости невозможно, поэтому для облегчения решения задач гидродинамики введено понятие *идеальной жидкости*.

Идеальная жидкость – это условно принятая жидкость, не сжимаемая при изменении давления и не расширяющаяся при изменении температуры, обладающая абсолютной подвижностью, т. е. вязкость жидкости равна нулю; не сопротивляющаяся деформации разрыва.

Таким образом, законы и уравнения гидродинамики выводятся для идеальной жидкости, затем в них вносятся дополнительные члены, коэффициенты, поправки с учетом физических свойств и условий движения реальной, вязкой жидкости.

В гидродинамике *поток жидкости* рассматривается как совокупность элементарных струек (рис. 4.1, а).



Рис. 4.1

Элементарная струйка – бесконечно малый замкнутый объем жидкости, поверхность которого образована линиями тока (рис. 4.1, б).

Линия тока – линия, в каждой точке которой в данное мгновение вектор скорости жидкости совпадает с касательной к этой линии. При

установившемся движении линия тока совпадает с траекторией движения материальной точки жидкости.

Для элементарной струйки приняты свойства, которые используются в теоретических выводах:

- а) форма струйки не изменяется с течением времени;
- б) поверхность струйки непроницаема со стороны окружающей жидкости, жидкость не входит в струйку и не выходит из неё;
- в) в силу малости нормального сечения струйки скорость в пределах сечения считается постоянной.

Различают два вида потоков.

Напорные потоки – это потоки жидкости, ограниченные со всех сторон твёрдыми стенками. Примерами служат движение воды, масла, нефти в трубопроводах, воздуха в вентиляционных системах и им подобные.

Безнапорные потоки – это потоки жидкости, ограниченные твёрдыми поверхностями не со всех сторон и имеющие по всей длине свободную поверхность. Примерами таких потоков являются движение жидкости в реках, каналах, лотках, желобах и других открытых руслах.

4.3. Гидравлические элементы потока

Живое сечение (ω) – сечение струйки или потока плоскостью, нормальной в каждой своей точке к проходящей через неё линии тока. Для равномерного и плавно изменяющегося движения живое сечение является плоским.

На рис. 4.2 представлено живое сечение для круглой трубы диаметром d , полностью заполненной жидкостью (рис. 4.2,а), и для открытого русла шириной b и глубиной наполнения h (рис. 4.2,б).

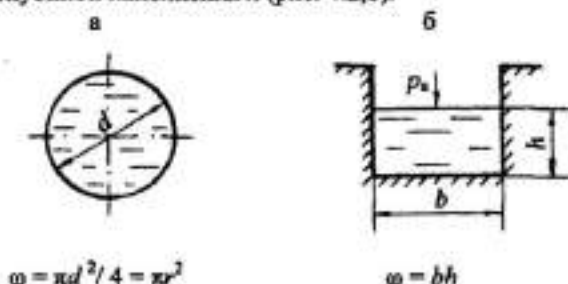


Рис. 4.2

Смоченный периметр (χ) – длина контура живого сечения по твёрдым стенкам русла. На рис. 4.2,а для круглой трубы $\chi = \pi d = 2\pi r$ (длина окружности круглой трубы); для открытого потока (см. рис. 4.2,б) $\chi = 2h + b$.

Гидравлический радиус (R) – отношение площади живого сечения к смоченному периметру:

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (4.1)$$

Для напорного потока в круглой трубе (см. рис. 4.2,а) гидравлический радиус

$$R = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4} = \frac{r}{2}; \quad \text{откуда } d = 4R, \quad (4.2)$$

для открытого потока (см. рис. 4.2,б)

$$R = \frac{bh}{2h + b}.$$

Гидравлический радиус (R) является универсальной геометрической характеристикой потока, которая может быть использована в теоретических выводах для потоков любой формы с различной степенью заполнения жидкостью.

4.4. Расход жидкости. Средняя скорость потока.

Уравнение неразрывности потока

Расходом называется количество жидкости, проходящее через живое сечение в единицу времени.

В зависимости от того, в чём выражают количество жидкости, различают:

- объёмный расход (Q);
- массовый расход (M);
- весовой расход (G).

Для вывода расчётной формулы объёмного расхода рассмотрим элементарную струйку в установившемся движении, выделим в ней живое сечение $d\omega$, которое за время dt переместится из положения 1 в положение 2, пройдя путь dl (рис. 4.3).



Рис. 4.3

Допустимо считать, что на расстоянии dl площадь живого сечения $d\omega$ остаётся постоянной и скорость u в живом сечении также постоянна согласно свойствам элементарной струйки.

При перемещении живого сечения из положения 1 в положение 2 за время dt жидкость заполнит отсек 1-2 объёмом $dV = d\omega dl$. Согласно определению объёмный расход для элементарной струйки

$$dQ = \frac{dV}{dt} = d\omega \frac{dl}{dt}.$$

При установившемся движении $\frac{dl}{dt} = u$, где u — скорость струйки в живом сечении, таким образом, расход для элементарной струйки:

$$dQ = u d\omega.$$

Переходя к целому потоку жидкости, следует учесть, что скорости струек в пределах живого сечения потока изменяются по величине и по направлению. Чтобы найти расход жидкости для целого потока, следует просуммировать расходы струек по всему живому сечению, т.е. проинтегрировать зависимость dQ по площади живого сечения потока ω :

$$Q = \int_{\omega} u d\omega.$$

Для инженерных расчётов вводится понятие средней, условной скорости потока (v).

Средняя скорость — это такая одинаковая для всех струек скорость, при которой расход жидкости равен суммарному расходу элементарных струек с действительными скоростями, тогда

$$v = \frac{\int u d\omega}{\omega} = \frac{Q}{\omega},$$

$$\text{отсюда} \quad Q = v \omega. \quad (4.3)$$

Единица измерения объёмного расхода Q : м³/с; л/с.

Массовый расход $M = \rho Q$, кг/с.

Весовой расход $G = \rho g Q$, Н/с.

Экспериментальное определение объёмного расхода (Q) проводится объёмным методом, а именно определяется время наполнения (t) определённого объёма жидкости (W) в мерной ёмкости, тогда

$$Q = \frac{W}{t}. \quad (4.4)$$

Объём протекающей жидкости (W) можно также определить по водомёру, счётчику воды или любому прибору для измерения скорости и расхода (примеры таких приборов будут рассмотрены ниже).

Важным уравнением в гидродинамике является *уравнение неразрывности потока* (приводится без вывода).

В случае, если плотность жидкости - величина постоянная ($\rho = \text{const}$), что имеет место при движении каплеобразных жидкостей, уравнение неразрывности имеет вид:

$$Q_1 = Q_2 = Q = \text{const}$$

или для двух сечений

$$v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2.$$

Как следствие можно записать
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}; \quad (4.5)$$

для круглой трубы:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}.$$

Для сплошного неразрывного потока расход жидкости постоянный, скорости в живых сечениях обратно пропорциональны площадям живых сечений.

4.5. Основное уравнение гидродинамики.

Уравнение Даниила Бернулли

Уравнение Бернулли является основным уравнением гидромеханики, с помощью которого решаются теоретические вопросы и инженерные задачи. Принципы действия многих приборов, в том числе для измерения скорости и расхода жидкости, основаны на уравнении Бернулли.

В уравнении Бернулли установлена связь между основными параметрами движения: давлением, скоростью в живом сечении струйки или потока и геометрическим положением живого сечения струйки или потока жидкости.

В данном разделе рассматривается уравнение Бернулли для *установившегося* движения жидкости, находящейся в поле действия сил тяжести, т. е. действует только ускорение свободного падения g .

Уравнение Бернулли выводится в три этапа:

- 1) для элементарной струйки идеальной жидкости (см. понятие идеальной жидкости и элементарной струйки в разделе 4.2);
- 2) для элементарной струйки реальной, вязкой жидкости;
- 3) для целого потока реальной жидкости.

Каждое из последующих уравнений выводится на основе предыдущего. Вместе с тем каждое уравнение имеет своё назначение и круг решаемых задач.

Рассмотрим последовательно все уравнения Д. Бернулли.

4.5.1. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости

Идеальная жидкость – это условная жидкость, в которой отсутствует такое физическое свойство, как вязкость. Идеальная жидкость обладает абсолютной текучестью и движется без возникновения сопротивлений, поэтому энергия струйки остаётся постоянной по ходу движения. Уравнение имеет вид:

$$z + \frac{P}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = \text{const.} \quad (4.6)$$

Для двух и более сечений по направлению движения струйки уравнение принимает вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} = \dots = \text{const} \quad (4.7)$$

Рассмотрим смысл всех слагаемых, входящих в уравнение (4.7).

4.5.2. Интерпретация уравнения Бернулли

Все члены уравнения имеют линейную размерность, поэтому могут характеризоваться с геометрической точки зрения как высоты или напоры, а с энергетической точки зрения как удельная энергия.

Геометрический смысл уравнения Бернулли:

$z = h_{\text{geom}}$ – геометрическая высота, или геометрический напор, отсчитывается от произвольной горизонтальной плоскости сравнения;

$\frac{P}{\rho g} = h_p$ – пьезометрический напор, или пьезометрическая высота (см.

раздел 1.3). Пьезометрический напор соответствует показанию пьезометра в заданном сечении струйки;

$\frac{u^2}{2g} = h_{\text{ск}}$ – скоростной напор в живом сечении струйки.

Уравнение (4.6) с геометрической точки зрения может быть записано:

$$h_{\text{геом.}} + h_p + h_{\text{ок.}} = H_{\text{полн.}} = \text{const}, \quad (4.8)$$

где $H_{\text{полн.}}$ – *полный напор* в заданном сечении струйки.

Сумма геометрического и пьезометрического напоров называется *статическим напором*, обозначается $H_{\text{ст.}}$:

$$h_{\text{геом.}} + h_p = H_{\text{ст.}} \quad \text{или} \quad z + \frac{p}{\rho g} = H_{\text{ст.}} \quad (4.9)$$

Графическое представление уравнения Бернулли называется диаграммой уравнения.

Для построения диаграммы рассмотрим элементарную струйку идеальной жидкости в установившемся плавно изменяющемся движении, выделим в ней два живых сечения 1-1 и 2-2 с площадями $d\omega_1$ и $d\omega_2$, со скоростями u_1 и u_2 и давлениями в этих сечениях p_1 и p_2 .

Представим графически уравнение (4.7).

Выбираем произвольно ориентированную *горизонтальную плоскость сравнения* 0-0 (рис. 4.4). Отсчёты геометрических высот сечений z_1 и z_2 от плоскости сравнения по вертикали вверх считаются положительными.



Рис. 4.4

Показываем z_1 и z_2 для выделенных сечений. В каждом сечении по вертикали прибавляем пьезометрические напоры $\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$, затем скоростные напоры $\frac{u_1^2}{2g}$ и $\frac{u_2^2}{2g}$.

При построении диаграммы следует учесть, что для изображённой струйки площадь второго живого сечения ω_2 меньше площади первого живого сечения ω_1 , значит, согласно уравнению неразрывности (см. формулу 4.5), скорость и скоростной напор во втором сечении больше, чем в первом: $\frac{u_2^2}{2g} > \frac{u_1^2}{2g}$.

Сумма трёх напоров для элементарной струйки идеальной жидкости величина постоянная, равная полному напору H . Показываем на диаграмме $H_{\text{полн.}} = \text{const.}$

Линия, соответствующая полному напору, называется линией полного напора. Для идеальной жидкости линии полного напора располагаются на одной горизонтальной плоскости.

Линия, соответствующая пьезометрическим напорам, называется пьезометрической линией.

Очертание пьезометрической линии соответствует форме элементарной струйки. Для струйки цилиндрической или плавно изменяющейся формы пьезометрическая линия является наклонной прямой. Анализ диаграммы показывает, что при сужении струйки скоростной напор возрастает, а статический напор падает.

Энергетический смысл уравнения Бернулли

Все слагаемые уравнения представляют *удельную энергию*, т. е. отнесённую к единице веса:

$z = e_{\text{потен.}}$ – удельная потенциальная энергия положения;

$\frac{P}{\rho g} = e_{\text{давл.}}$ – удельная потенциальная энергия давления;

$\frac{u^2}{2g} = e_{\text{кин.}}$ – удельная кинетическая энергия.

С энергетической точки зрения уравнение имеет вид:

$$e_{\text{потен.}} + e_{\text{давл.}} + e_{\text{кин.}} = E = \text{const.}, \quad (4.10)$$

где E – полная удельная энергия струйки.

Для идеальной жидкости полная удельная энергия струйки остаётся постоянной для всех сечений по длине движущейся струйки. Таким образом, уравнение Бернулли согласуется с *законом сохранения энергии*.

Закон сохранения энергии можно проследить на диаграмме (см. рис.4.4): во втором сечении удельная кинетическая энергия $(\frac{u_2^2}{2g})$ увеличивается, значит, удельная потенциальная энергия $(z_2 + \frac{p_2}{\rho g})$ уменьшается.

4.5.3. Уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной, вязкой жидкости

Реальная жидкость считается несжимаемой, обладающей важным физическим свойством - вязкостью (см. раздел "Общие сведения о жидкостях"). Вязкость противодействует относительному перемещению слоев жидкости, в связи с чем возникают силы трения. На преодоление сил трения затрачивается энергия (напор) движущейся жидкости. Это значит, что полный напор (H) или полная удельная энергия (E) струйки не остаются постоянными по длине движущейся струйки, часть напора (энергии) затрачивается на преодоление сил трения.

В уравнение Бернулли вводится дополнительный член h'_{Σ} , называемый потерями напора. Таким образом, если H_1 — полный напор в первом сечении струйки, то ко второму сечению останется полный напор H_2 , а часть напора $h'_{\Sigma-2}$ израсходуется на преодоление гидравлических сопротивлений между первым и вторым сечениями:

$$H_1 = H_2 + h'_{\Sigma-2}. \quad (4.11)$$

Уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной, вязкой жидкости принимает вид

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h'_{\Sigma-2}. \quad (4.12)$$

Геометрический и энергетический смысл каждого слагаемого уравнения остаётся таким же, как для идеальной жидкости.

Представим диаграмму уравнения для элементарной струйки реальной жидкости на рис. 4.5.

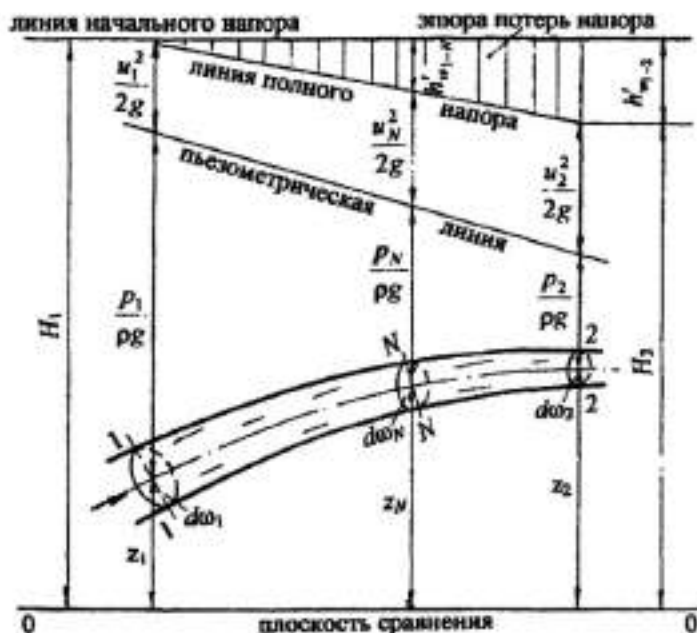


Рис. 4.5

Чтобы проследить подобие построения диаграммы, примем элементарную струйку примерно той же формы, что для идеальной жидкости (см. рис. 4.4). Выделим два живых сечения 1-1 и 2-2 с площадями $d\omega_1$ и $d\omega_2$, покажем три напора (геометрический, пьезометрический, скоростной) в первом сечении и полный напор в первом сечении — H_1 . Для второго сечения аналогично отложим три напора так, чтобы полный напор во втором сечении H_2 был меньше полного напора в первом сечении на величину h'_{1-2} .

Величина h'_{1-2} — это потери напора между сечениями 1-1 и 2-2. Обозначим на диаграмме *линию полного напора*, *пьезометрическую линию*, а также *линию начального напора* (см. рис. 4.5).

Если выбрать любое сечение $N-N$ по длине движущейся струйки, то для него можно показать потери напора h'_{1-N} в виде вертикальной линии между линией начального напора и линией полного напора.

Таким образом, вертикальные штриховые линии между линией начального напора и линией полного напора будут соответствовать потерям напора по длине реальной струйки, а заштрихованная часть называется *зторой потерь напора*.

4.5.4. Уравнение Бернулли для целого потока реальной, вязкой жидкости

Переходя к целому потоку, учитываем струйную модель потока. Это значит, чтобы записать уравнение для целого потока, нужно просуммировать энергии струек, составляющих поток, по всему живому сечению потока.

Подробный теоретический вывод уравнения следует изучить по учебнику или курсу лекций. Рассмотрим более упрощенно и кратко теоретические положения по уравнению Бернулли для потока реальной жидкости.

Два слагаемых уравнения $z + \frac{P}{\rho g}$ соответствуют статическому напору $H_{ст}$ согласно формуле (4.9). В гидродинамике принято считать: *распределение статического напора по живому сечению подчиняется гидростатическому закону*:

$$z + \frac{P}{\rho g} = \text{const.} \quad (4.13)$$

Покажем этот закон графически на рис. 4.6. В заданном живом сечении потока (ω) выделим произвольно элементарные струйки 1, 2, 3, давления в которых p_1, p_2, p_3 соответственно. Проведём плоскость сравнения 0-0 и покажем геометрические высоты (z_1, z_2, z_3) живых сечений струек.

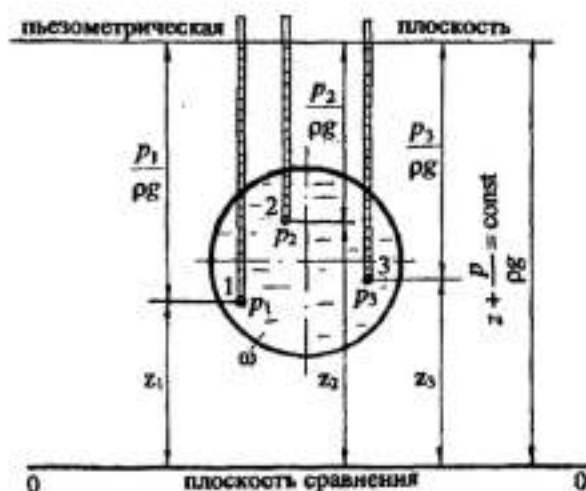


Рис. 4.6

На уровне выбранных струек покажем пьезометры и соответственно пьезометрические напоры $(\frac{P_1}{\rho g}, \frac{P_2}{\rho g}, \frac{P_3}{\rho g})$. Уровни жидкости во всех пьезометрах будут на одном горизонте, а сумма $z + \frac{P}{\rho g} = \text{const}$. Такая

постоянная величина статического напора будет только в данном живом сечении, в другом сечении она будет также постоянной, но другой величины.

Следующая задача – просуммировать кинетические энергии струек, составляющих поток, по живому сечению потока. Скорости струек (u) в пределах живого сечения потока переменны, поэтому следует учесть неравномерность распределения скорости по живому сечению.

Для практических расчётов вводят *среднюю, или условную, скорость* потока (v) (см. раздел 4.4), одинаковую для всех струек. Теоретически рассчитывают *условную кинетическую энергию* ($E_{\text{усл}}^{\text{кин}}$) через среднюю скорость потока v .

Затем теоретически определяют *действительную кинетическую энергию* ($E_{\text{дейст.}}^{\text{кин}}$) через действительные скорости (u) элементарных струек, составляющих поток.

Неравномерность распределения скорости по живому сечению учитывают коэффициентом корреляции кинетической энергии, или *коэффициентом неравномерности распределения скорости* – α :

$$\alpha = \frac{E_{\text{дейст.}}^{\text{кин}}}{E_{\text{усл}}^{\text{кин}}}. \quad (4.14)$$

Коэффициент α называется также *коэффициентом Корiolиса*.

Значение коэффициента α зависит от режима движения жидкости. Режимы движения жидкости будут рассмотрены ниже. Пока следует учесть, что для ламинарного режима $\alpha = 2,0$; для турбулентного режима $\alpha = 1,0 + 1,15$ (для практических расчётов при турбулентном режиме воды принимают $\alpha = 1,0$).

С учётом введённого коэффициента α скоростной напор ($h_{\text{ск}}$) или удельная кинетическая энергия потока ($e_{\text{кин}}$) представляется как $\frac{\alpha v^2}{2g}$.

Дополнительный член уравнения Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости h'_s учитывает потери напора в элементарной струйке.

Для целого потока вводится осреднённая величина потерь напора h_s . Аналогично средней скорости считается, что суммарные потери напора элементарных струек с действительными величинами условно равны полным потерям напора для потока h_s .

С учётом выше изложенных положений уравнение Бернулли для *целого потока реальной жидкости* принимает вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2} \quad (4.15)$$

Уравнение (4.15) является *основным уравнением гидродинамики*, которым пользуются для решения теоретических и инженерных задач.

Диаграмма уравнения для *целого потока реальной жидкости* аналогична диаграмме для элементарной струйки реальной жидкости (см. рис. 4.5). На диаграмме следует обозначить живые сечения ω_1 и ω_2 , а скоростные напоры соответственно $\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$ и $\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$.

Рассмотрим практическое применение уравнения Бернулли.

4.5.5. Экспериментальное определение статического и полного напоров. Расчёт скорости в точке потока

Рассмотрим наклонную трубу диаметром d , выделим живое сечение ω , в котором следует определить статический и полный напор по оси трубы (рис. 4.7).

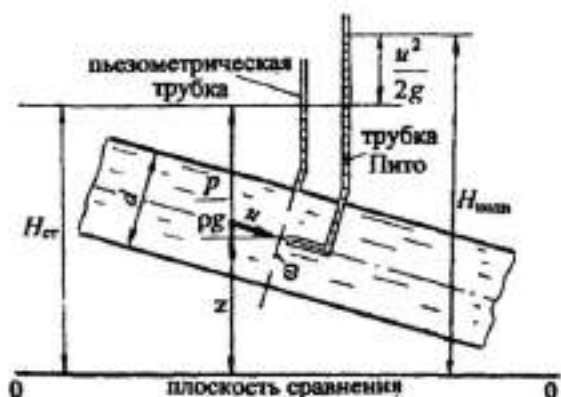


Рис. 4.7

Проведём произвольно плоскость сравнения 0-0 и отложим геометрический напор сечения (z) до оси живого сечения ω . Покажем пьезометр в живом сечении и отметим пьезометрический напор ($\frac{p}{\rho g}$) по уровню жидкости в пьезометре.

Таким образом, по показанию пьезометра определим статический напор:

$$H_{ст} = z + \frac{P}{\rho g}.$$

Для определения полного напора по оси потока пользуются трубкой Пито. Это трубка очень малого диаметра с загнутым под углом 90° и гладко обработанным концом. Трубка Пито устанавливается по оси трубы или в любой другой точке потока так, чтобы скорость u была направлена на входное отверстие трубки. Если бы не было движения жидкости ($u = 0$), уровни жидкости в пьезометре и трубке Пито были бы на одном горизонте. При действии скорости u на входе в трубку Пито уровень жидкости в трубке поднимется выше уровня в пьезометре на величину, соответствующую скоростному напору, $-\frac{u^2}{2g}$.

Таким образом, трубкой Пито определяется полный напор в заданной точке потока, в частности по оси потока.

Трубка Пито в сочетании с пьезометром является прибором для измерения скорости.

Действительно, разность показаний трубки Пито и пьезометра соответствует скоростному напору:

$$\frac{u^2}{2g} = H_{полн} - H_{ст}.$$

отсюда скорость в точке потока: $u = \sqrt{2g(H_{полн} - H_{ст})}$.

Для практических расчётов скорости пользуются формулой

$$u = \varphi \sqrt{2g(H_{полн} - H_{ст})}, \quad (4.16)$$

где φ – поправочный коэффициент, который определяется путём тарирования трубки Пито.

Для определения скорости воздушных и газовых потоков пользуются пневмометрической трубкой Пито-Прандтля. В такой трубке совмещены пьезометр и трубка Пито. В корпусе трубки через прорезь в горизонтальной части снимается статический напор, а через открытый носик трубки определяется полный напор. Трубка подключается к U-образному манометру, микроманометру, дифференциальному манометру или подобным приборам для измерения разности давлений (напоров). По показанию прибора рассчитывается скоростной напор. С конструкцией трубки Пито-Прандтля следует ознакомиться в учебной литературе.

4.5.6. Диаграмма уравнения Бернулли для потока жидкости в трубе переменного сечения

Рассмотрим экспериментальное построение диаграммы уравнения Бернулли для потока жидкости в трубе переменного сечения диаметрами d_1, d_2, d_3 (рис. 4.8). Пусть $d_2 < d_1 < d_3$. Для построения диаграммы воспользуемся принятой методикой (см. разделы 4.5.2; 4.5.3).

По направлению движения жидкости выделим три живых сечения 1-1; 2-2; 3-3; выберем плоскость сравнения 0-0 и отложим геометрические высоты (напоры) выбранных сечений: z_1, z_2, z_3 .

В сечениях покажем пьезометрические трубки. Как было отмечено выше (см. раздел 4.5.2), при сужении трубы пьезометрический напор падает, а скоростной напор возрастает, и, наоборот, при расширении трубы пьезометрический напор повышается, а скоростной напор уменьшается.

Отметим уровни жидкости в пьезометрах ($\frac{p_1}{\rho g}, \frac{p_2}{\rho g}, \frac{p_3}{\rho g}$). К геометрическим напорам прибавим пьезометрические напоры. Проведём *пьезометрическую линию* по уровням жидкости в пьезометрах (см. рис. 4.8).

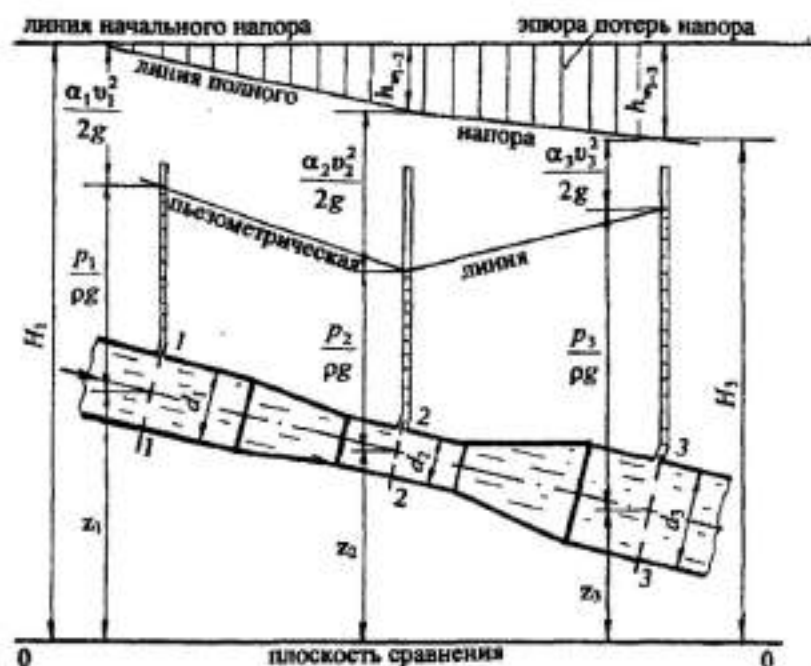


Рис. 4.8

Анализ построения пьезометрической линии показывает, что *пьезометрическая линия* очерчивается ломаной линией, которая *может повышаться или понижаться* в зависимости от геометрических размеров трубы.

К сумме геометрического и пьезометрического напоров прибавим скоростные напоры в сечениях: $\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} > \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} > \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g}$.

В каждом сечении получаем полные напоры, причём следует учесть, что $H_1 > H_2 > H_3$, соединим ломаной линией их значения. Это *линия полного напора*, показываем её на диаграмме (см. рис. 4.8).

Линия полного напора по ходу движения жидкости *понижается*. Понижение линии полного напора соответствует величине потерь напора между сечениями по ходу движения жидкости.

Вертикальными линиями заштриховываем эпюру потерь напора.

Методика построения пьезометрической линии, линии полного напора и эпюры потерь напора будет применена при расчёте трубопроводных систем.

Следует запомнить, что на участках трубы с *постоянным диаметром* линия полного напора проходит *параллельно* пьезометрической линии на расстоянии, равном скоростному напору.

4.5.7. Методика составления уравнения Бернулли для решения теоретических и инженерных задач

С помощью уравнения Бернулли решаются многие теоретические и практические задачи. Применение уравнения Бернулли предусмотрено для реальной, вязкой жидкости при установившемся движении для тех сечений, где движение не должно быть резко изменяющимся.

На использовании уравнения Бернулли основано создание приборов для измерения скорости и расхода потока жидкости.

При составлении уравнения Бернулли следует пользоваться следующей *методикой*.

1. *Выбираются два сечения*, в которых известно наибольшее количество параметров, входящих в уравнение, или их нужно определить. Такими сечениями служат свободная поверхность жидкости или места установки измерительных приборов (манометров, вакуумметров, пьезометров и им подобных). Сечения проводятся горизонтально по свободной поверхности (для практических расчётов скорость на свободной поверхности принимается равной нулю, $v = 0$) или нормально к направлению движения жидкости, т. е. по живому сечению.

2. Сечения нумеруются по направлению движения жидкости. Это обусловлено тем, что потери напора в гидравлических сопротивлениях увеличиваются по направлению движения жидкости, и дополнительный член уравнения h_{Σ} , учитывающий эти потери, должен быть со знаком плюс.

3. В уравнении Бернулли рекомендуется учитывать *абсолютное давление в выбранных сечениях*. Это позволит избежать ошибок при определении давления в сечениях.

4. *Выбирается плоскость сравнения 0-0*. Как правило, она совмещается с одним из сечений или проводится через его ось, тогда геометрическая высота этого сечения равна нулю ($z = 0$). Следует помнить, что плоскость сравнения всегда горизонтальная. Отсчёты геометрической высоты сечения z от плоскости сравнения вверх считаются положительными, вниз – отрицательными.

5. *Уравнение Бернулли записывается в общем виде*. Под уравнением представляются значения параметров. Производится подстановка всех величин в уравнение в буквенном выражении. Уравнение решается относительно неизвестного параметра.

Ниже рассмотрим применение уравнения Бернулли для приборов, служащих для измерения скорости и расхода потока жидкости. В этих приборах можно пренебречь потерями напора.

4.5.8. Приборы для измерения скорости и расхода, основанные на уравнении Бернулли

Расходомер Вентури - это труба с плавным переходом от большего диаметра к меньшему, небольшой цилиндрической вставки меньшего диаметра и плавного перехода от меньшего диаметра к большему. В широкой и узкой части расходомера подключены приборы для измерения давления, например пьезометры, по показаниям которых рассчитывается скорость и расход неразрывного потока. Как правило, соотношение диаметров принимается равным: $d_2 : d_1 = 1/2; 1/3$ и тому подобным.

Схема расходомера представлена на рис. 4.9. Для определения скорости и расхода жидкости воспользуемся уравнением Бернулли. Пусть представленный прибор является водомером. Согласно принятой *методике* (см. раздел 4.5.7), выполним все пункты составления уравнения.

1. Выберем два живых сечения в местах установки пьезометров. Сечения проведём нормально к направлению движения потока воды.

2. Сечения 1-1 и 2-2 пронумеруем по направлению движения воды.

3. В выбранных сечениях покажем пьезометрические напоры:

$\frac{p_1}{\rho g}$ и $\frac{p_2}{\rho g}$, обозначим разность показаний пьезометров через h .

4. Проведём произвольно горизонтальную плоскость сравнения 0-0 и покажем геометрические высоты выбранных сечений z_1 и z_2 (рис. 4.9).

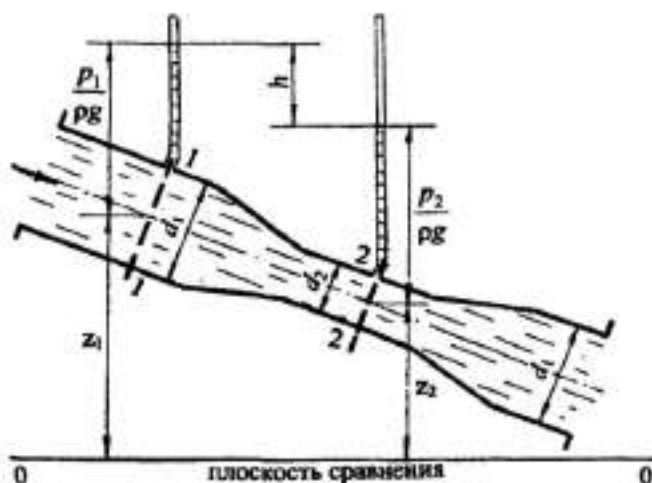


Рис. 4.9

5. Запишем уравнение Бернулли в общем виде:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\pi-2}.$$

Пренебрегаем потерями напора в водосре ($h_{\pi-2} = 0$), считая, что переходы от одного диаметра к другому сделаны плавно и хорошо механически обработаны, как этого требуют приборы.

Принимаем $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,0$ для движения воды в круглой трубе при турбулентном движении.

Группируя соответственно члены уравнения со статическим и скоростным напорами, получим:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g}\right) = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}.$$

Из рис. 4.9 следует:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g}\right) = h,$$

значит,

$$h = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}.$$

В этом уравнении два неизвестных v_1 и v_2 , но из условия неразрывности потока (см. формулу (4.5)) следует, что $v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2$.

Определяем отсюда $v_2 = v_1 \frac{\omega_1}{\omega_2}$, далее $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$. Для лучшего понимания дальнейшего решения, принимаем $d_2 : d_1 = 1/2$, тогда $v_2 = 4v_1$.

Разность показаний пьезометров h

$$h = \frac{16v_1^2 - v_1^2}{2g} = \frac{15v_1^2}{2g},$$

отсюда

$$v_1 = \sqrt{\frac{2gh}{15}}.$$

Расход воды

$$Q = v_1 \omega_1 = \omega_1 \sqrt{\frac{2gh}{15}} = K_{\text{проб.}} \omega_1 \sqrt{h},$$

где

$$K_{\text{проб.}} = \sqrt{\frac{2g}{15}}.$$

Значение поправочного коэффициента прибора ($K_{\text{проб.}}$) зависит от соотношения диаметров расходомера Вентури в широкой и узкой частях прибора. Как правило, в расчётную формулу расхода (Q) вводится также тарировочный коэффициент φ , который учитывает потери напора в расходомере и определяется опытным путём.

Формула расхода принимает вид: $Q = \varphi K_{\text{проб.}} \omega_1 \sqrt{h}$. (4.17)

Анализируя формулу (4.17), видим, что расход жидкости является функцией разности показаний пьезометров (h) или показания другого прибора для измерения разности напоров. Для удобства практических расчётов можно построить графическую зависимость $Q = f(h)$ или $v_1 = f(h)$; $v_2 = f(h)$. Это будет квадратичная зависимость, графически в виде параболы.

Расходомер Вентури используется не только для каплевидных жидкостей, но и для газообразных. В этом случае в широкой и узкой частях расходомера выводятся штуцера, к которым подсоединяется жидкостный прибор для измерения разности давлений, например U-образный манометр или микроманометр с наклонной трубкой. Конструкция и принцип действия таких приборов подробно изложены в учебниках и учебных пособиях.

Входной коллектор. Входной коллектор используется для определения скорости и расхода во всасывающих воздушных, газовых, вентиляционных, пневмотранспортных и других системах.

Входной коллектор устанавливается на входе в систему и представляет трубу с плавным входом, выполненным по какому-либо криволинейному закону, например по параболе (рис. 4.10), так, чтобы исключить потери напора на входе в коллектор.

На расстоянии 3-5 диаметров трубы от входа выводится штуцер, к которому подключается жидкостный прибор для измерения давления (U-образный манометр, микроманометр). Рабочей жидкостью в приборе может быть вода, спирт или другая каплевидная жидкость. По показанию прибора (h) рассчитывается средняя скорость потока газообразной жидкости в трубе и её расход.

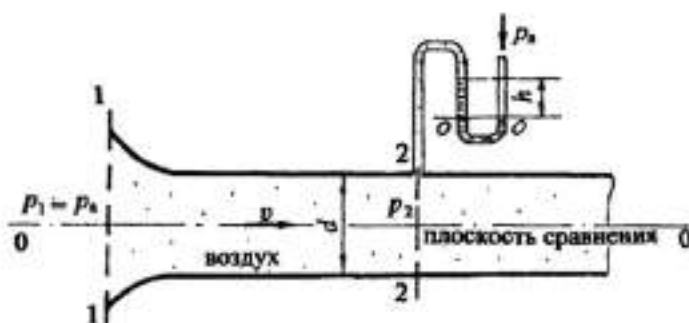


Рис. 4.10

Покажем расчёт скорости и расхода газообразной жидкости во всасывающей системе, пользуясь уравнением Бернулли.

1. **Выберем два сечения** по кромке входного сечения коллектора, где скорость ещё практически отсутствует, и в месте установки измерительного прибора. Сечения проведём нормально к направлению движения жидкости, например воздуха (см. рис. 4.10).

2. **Пронумеруем сечения 1-1 и 2-2 по направлению движения воздуха.**

3. Учтём *абсолютное давление в выбранных сечениях*. Абсолютное давление в первом сечении $p_1 = p_a$. Абсолютное давление во втором сечении будет меньше атмосферного, так как всасывание идёт за счёт создания вакуума. Пользуясь уравнениями гидростатики (см. разделы 1.3; 1.5), составим условие равенства давления относительно плоскости уровня $O-O$ в U -образном манометре, получим абсолютное давление во втором сечении $p_2 = p_a - \rho_{жидк} g h$.

4. *Плоскость сравнения $0-0$ совместим с осью коллектора*, тогда геометрические высоты сечений $z_1 = 0$; $z_2 = 0$ (см. рис. 4.10).

5. Запишем уравнение Бернулли в общем виде, под уравнением представим значения всех параметров и сделаем подстановку данных. При подстановке слагаемых уравнения принимаем $\alpha_2 = 1,0$ (круглая труба), потерями напора на входе в коллектор и на участке в трубе между сечениями 1-1 и 2-2 пренебрегаем:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{пот.2}}$$

$$\begin{aligned} z_1 &= 0; & z_2 &= 0; \\ p_1 &= p_a; & p_2 &= p_a - \rho_{жидк} g h; \\ v_1 &= 0; & \alpha_2 &= 1,0; \quad v_2 = v; \quad h_{\text{пот.2}} = 0. \end{aligned}$$

Принимаем движущуюся жидкость – воздух плотностью $\rho_{возд}$. После подстановки слагаемых в уравнение Бернулли:

$$\frac{p_a}{\rho_{возд} g} = \frac{p_a}{\rho_{возд} g} - \frac{\rho_{жидк} g h}{\rho_{возд} g} + \frac{v^2}{2g}$$

После соответствующих сокращений и преобразований получим расчётную формулу для скорости движения воздуха в трубе:

$$v = \sqrt{\frac{2g \rho_{жидк} h}{\rho_{возд}}} = K_{\text{колл}} \sqrt{h},$$

где $K_{\text{колл}} = \sqrt{\frac{2g \rho_{жидк}}{\rho_{возд}}}$ – коэффициент прибора (коллектора), зависящий от вида транспортируемой жидкости (воздух, газ) и плотности жидкости в измерительном приборе давления.

Как правило, приборы для измерения скорости и расхода тарируются, т. е. проверяются расчёты по поверенным, стандартным приборам и вводится поправочный тарировочный коэффициент φ , тогда

$$v = \varphi K_{\text{ном}} \sqrt{h}, \text{ соответственно } Q = \varphi K_{\text{ном}} \omega \sqrt{h}, \quad (4.18)$$

где $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$ - площадь живого сечения трубы.

Формула расхода для коллектора (4.18) аналогична формуле расхода для расходомера Вентури (4.17).

По аналогии с расходомером Вентури для входного коллектора можно построить графическую зависимость $v = f(h)$ и $Q = f(h)$, которой практически удобно пользоваться для определения скорости и расхода без проведения расчётов.

4.6. Режимы движения жидкости

Английский физик Осборн Рейнольдс на основе многочисленных опытов и обработки данных других учёных в 1883 году представил теоретические положения о двух режимах движения жидкости - ламинарном и турбулентном.

Ламинарный режим - это спокойное, прямолинейное, параллельно струйное, послойное движение жидкости.

Турбулентный режим - это неупорядоченное движение струек, с поперечными пульсациями скорости, колебаниями, завихрениями струек, а при больших скоростях с полным перемешиванием жидкости.

Классические опыты Рейнольдса и теоретические положения по изучению режимов движения жидкости подробно изложены во всех учебниках и учебных пособиях, поэтому рассмотрим основные расчётные формулы, необходимые для практических расчётов.

На опытной установке Рейнольдса экспериментально изучено, что при малых скоростях движения жидкости можно наблюдать ламинарный режим.

При дальнейшем увеличении скорости наблюдается разрушение параллельной струйности, колебания, разрыв струек, а при ещё большем увеличении скорости - завихрения струек и перемешивание потока, т. е. устанавливается турбулентный режим.

Скорость, соответствующая переходу одного режима в другой называется **критической**, обозначается $v_{\text{кр}}$. Как правило, учитывают два значения критической скорости: **верхнюю** $v_{\text{кр}}$ (переход от ламинарного режима к турбулентному) и **нижнюю** $v_{\text{кр}}$ (переход от турбулентного режима к ламинарному). Область движения, соответствующая переходу от одного режима к другому, считается **неустойчивым** движением или **переходной областью**.

Согласно теории Рейнольдса, критическая скорость ($v_{кр.}$) зависит от диаметра трубы (d) кинематического коэффициента вязкости жидкости (ν) и параметра $Re_{кр.}$, называемого критическим числом Рейнольдса, или *критерием Рейнольдса*:

$$v_{кр.} = Re_{кр.} \frac{\nu}{d} \quad (4.19)$$

Критерий Рейнольдса (Re) – величина безразмерная.

Экспериментальные исследования показали, что для труб круглого сечения $Re_{кр.}$ может меняться от 1000 до 2300. Общепринятым для практических расчётов считается $Re_{кр.} = 2300$.

Если скорость движения жидкости будет меньше критической ($v < v_{кр.}$), то режим движения будет ламинарным и $Re < Re_{кр.}$, и, наоборот, при $v > v_{кр.}$ число Рейнольдса должно быть больше критического – $Re > Re_{кр.}$.

Таким образом, критерий Рейнольдса является гидродинамической характеристикой потока, по которому устанавливается режим движения.

В соответствии с формулой (4.19), расчётная формула Re для круглой трубы:

$$Re = \frac{v d}{\nu} \quad (4.20)$$

для потоков другого профиля $Re = \frac{v I}{\nu}$, (4.21)

где I – характерный геометрический размер, который может быть выражен через гидравлический радиус (R) (см. формулу 4.1), например, для круглой трубы $I = 4R$ (см. формулу 4.2).

Следует запомнить правило:

Если для потока жидкости $Re \leq Re_{кр.} = 2300$ – режим движения жидкости ламинарный.

Если для потока жидкости $Re > Re_{кр.} = 2300$ – режим движения жидкости турбулентный.

Ламинарный режим движения характерен для вязких жидкостей таких, как масла, нефть, а также при движении воды в трубках малого диаметра (капиллярах) и через поры грунта.

В турбулентном режиме движется вода в водопроводных трубах, желобах, каналах, реках.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

5.1. Потери напора в гидравлических сопротивлениях

Дополнительный член уравнения Бернулли h_w (см. формулу (4.15)) соответствует потерям напора в гидравлических сопротивлениях, которые складываются из суммарных потерь напора в местных сопротивлениях (Σh_r) и потерь напора по длине (h_l):

$$h_w = \Sigma h_r + h_l. \quad (5.1)$$

В гидродинамике принято считать, что потери напора в любом гидравлическом сопротивлении пропорциональны скоростному напору $\frac{v^2}{2g}$.

Местными сопротивлениями называются различного рода устройства, при прохождении через которые происходит деформация потока, изменение направления движения жидкости или величины скорости, или того и другого.

К местным сопротивлениям относятся краны, задвижки, отводы (колена), внезапное сужение, внезапное расширение, вход в трубу и прочие.

Знак суммы (Σ) в местных сопротивлениях показывает, что на одном трубопроводе может быть установлено несколько местных сопротивлений, потери напора в которых суммируются.

Теоретически потери напора в местном сопротивлении рассчитываются по формуле

$$h_r = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (5.2)$$

где ζ — **коэффициент местного сопротивления**, значения которого, как правило, устанавливаются экспериментально, для некоторых видов местных сопротивлений коэффициент ζ рассчитан теоретически. На величину коэффициента ζ влияют геометрические размеры, конфигурация местного сопротивления и режим течения жидкости.

Значения коэффициентов местных сопротивлений ζ приводятся в справочниках и таблицах, в данном учебном пособии в табл. 4 (см. приложение).

Потери напора по длине — это потери напора, возникающие при движении жидкости вдоль стенок трубопровода, зависящие от диаметра (d), длины трубы (l), скоростного напора и состояния внутренней поверхности

трубы. Потери напора по длине называются также *линейными потерями* и рассчитываются по формуле

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (5.3)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления, или *коэффициент Дарси*

Значение коэффициента λ или выбор расчётной зависимости этого коэффициента *зависит от режима движения жидкости и шероховатости трубы* (или другого русла).

В гидродинамике введено *понятие единичных, или удельных, потерь напора по длине, называемых гидравлическим уклоном*. Гидравлический уклон $I = h_l/l$ и рассчитывается по формуле

$$I = \lambda \frac{1}{d} \frac{v^2}{2g}. \quad (5.4)$$

Расчётные зависимости гидравлического уклона (I) для различных режимов движения выводятся теоретически или эмпирически, затем можно перейти к потерям напора по длине (h_l). Многими учёными проведены исследования движения жидкости при турбулентном режиме, как наиболее сложном, и даны эмпирические зависимости для коэффициента гидравлического сопротивления (λ), который входит в расчётные формулы (5.3) и (5.4).

Иногда при расчётах потери напора в местных сопротивлениях заменяют потерями напора в прямолинейном участке трубы *эквивалентной длины*.

Эквивалентная длина (l_2) – это такая длина прямолинейного участка трубы, потери напора в котором равны (эквивалентны) потерям напора в местном сопротивлении при том же расходе жидкости:

$$\lambda \frac{l_2}{d} \frac{v^2}{2g} = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (5.5)$$

$$\text{значит,} \quad l_2 = \frac{\zeta d}{\lambda}. \quad (5.6)$$

Рассмотрим, от каких факторов и параметров зависят потери напора по длине при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости.

5.2. Потери напора по длине при ламинарном режиме движения жидкости

Исследования Рейнольдса и других учёных показали, что при ламинарном режиме потери напора пропорциональны скорости в первой степени и зависят только от числа Рейнольдса (Re).

Аналитически выведена формула для гидравлического уклона (вывод этой зависимости приведён во всех учебниках и учебных пособиях) при ламинарном режиме:

$$l = \frac{64}{Re} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}. \quad (5.7)$$

Сравнив формулу (5.7) с формулой (5.4), заключаем, что при ламинарном режиме коэффициент гидравлического сопротивления (λ):

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \text{ т.е. } \lambda = f(Re). \quad (5.8)$$

Потери напора по длине при ламинарном режиме соответственно рассчитываются по формуле

$$h_l = \frac{64}{Re} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}. \quad (5.9)$$

Формула (5.9) носит имя автора доктора медицины *Пуазейля*, который исследовал движение жидкости, в частности крови, в капиллярных трубках, вывел эту формулу эмпирически, в гидродинамике формула доказана аналитически.

5.3. Потери напора по длине при турбулентном режиме

Турбулентное течение жидкости является наиболее распространённым в технике, но представляет в то же время одно из сложных гидравлических процессов. Многочисленные исследования учёных показали, что создать строгую теорию турбулентного режима не представляется возможным, поэтому для теоретических и инженерных расчётов пользуются экспериментальными данными, графическими зависимостями и эмпирическими формулами.

Как отмечено выше, при числах Рейнольдса $Re < Re_{кр}$ имеет место ламинарный режим движения. С возрастанием скорости потока и чисел Рейнольдса снижается устойчивость ламинарного режима, начинаются

колебательные движения струек, появляются пульсации скорости, т. е. кроме продольных составляющих скорости возникают поперечные составляющие, при дальнейшем увеличении скорости образуются завихрения, неупорядоченное движение, перемешивание потока, т. е. режим движения становится турбулентным.

Разрушение ламинарного течения начинается с оси потока, постепенно образуется турбулентное ядро потока, а у стенки трубы остается *пограничный (пристеночный) слой*, который состоит из *ламинарного (вязкого) подслоя и переходного слоя*.

Ламинарный подслоем расположен непосредственно у стенки трубы, скорость в нём меняется от 0 у стенки (частицы жидкости просто прилипают к стенке и не двигаются) до некоторой величины. Изменение скорости в пределах вязкого слоя близко к линейному закону.

Толщина ламинарного подслоя (δ) имеет малую величину (от долей миллиметра до 1-2 мм) и рассчитывается по формуле

$$\delta = \frac{30d}{Re\sqrt{\lambda}} \quad (5.10)$$

Из формулы (5.10) следует, что с увеличением числа Рейнольдса (Re) толщина вязкого подслоя уменьшается.

5.3.1. Понятие о гидравлически гладких и шероховатых трубах

Рассмотрим, как влияет *шероховатость* труб на потери напора по длине при турбулентном режиме.

На внутренней поверхности трубы имеются неровности, выступы, которые называются *шероховатостью*.

Различают:

а) *абсолютную шероховатость*, которая соответствует высоте выступов, неровностей, обозначается Δ , измеряется в мм;

б) *относительную шероховатость*: $\frac{\Delta}{d}$ или $\frac{\Delta}{r}$;

в) *относительную гладкость* — величина, обратная относительной шероховатости: $\frac{d}{\Delta}$ или $\frac{r}{\Delta}$.

Форма и высота выступов и неровностей вдоль стенки трубы неодинаковы, поэтому измерить и учесть абсолютную шероховатость практически невозможно. С целью упрощения гидравлических расчётов введено понятие *эквивалентной шероховатости* (Δ_s), при которой потеря напора в трубе равны (эквивалентны) потерям напора с фактической неоднородной шероховатостью.

В данном учебном пособии, как и во многих учебниках, в расчётных формулах эквивалентная шероховатость Δ , упрощённо может записываться, как абсолютная шероховатость Δ .

Значение эквивалентной шероховатости Δ , для некоторых видов труб приведено в табл. 6 (см. приложение).

Согласно данным большинства учёных и авторов учебников, при турбулентном режиме можно выделить *три зоны (области) сопротивления*.

1. *Движение вдоль гладких стенок*. Это случай, когда толщина вязкого слоя больше абсолютной шероховатости ($\delta > \Delta_s$). Турбулентное ядро скользит по ламинарному подслою. Выступы, неровности перекрыты вязким слоем, шероховатость не влияет на потери напора. Такие трубы называются *“гидравлически гладкими”*. Потери напора по длине пропорциональны скорости $v^{1,75}$. Коэффициент гидравлического сопротивления (λ) не зависит от шероховатости и является функцией только числа Рейнольдса (Re).

Для этой зоны сопротивления пользуются *эмпирической формулой Блазиуса*:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (5.11)$$

т. е. $\lambda = f(Re)$

2. *Зона доквадратичного сопротивления*. Это область сопротивления, в которой потери напора зависят как от числа Рейнольдса (Re), так и от шероховатости. Потери напора по длине пропорциональны скорости $v^{1,75-2,0}$, т. е. степенной коэффициент скорости до 2,0, отсюда и название – “зона доквадратичного сопротивления”.

В этой области происходит переход от *гидравлически гладкого* к *вполне шероховатому трению*.

А. Д. Альтшуль обобщил экспериментальные данные, графические зависимости и теоретические положения ряда учёных и для зоны доквадратичного сопротивления предложил эмпирическую формулу

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_s}{d} \right)^{0,25}, \quad (5.12)$$

т. е. $\lambda = f\left(Re; \frac{\Delta_s}{d}\right)$.

3. *Зона квадратичного сопротивления*. Это движение, при котором толщина вязкого слоя меньше абсолютной шероховатости ($\delta < \Delta_s$). Вязкий слой при больших числах Рейнольдса (Re) практически разрушен, турбулентное ядро касается неровностей, возникают дополнительные завихрения и связанные с ними потери напора. Потери напора по длине

пропорциональны скорости v^2 , отсюда и название — “зона квадратичного сопротивления”.

Коэффициент гидравлического сопротивления (λ) является функцией шероховатости. Другое название этой области сопротивления — “*движение вдоль шероховатых стенок*”, а трубы называются “*гидравлически шероховатыми*”.

Для этой области в соответствии с гидравлическими особенностями явлений турбулизации применимы эмпирические формулы многих учёных. Для практических расчётов рекомендуется пользоваться формулами:

$$\text{формула Никурадзе: } \lambda = \frac{1}{\left(1,74 + 2 \lg \frac{r}{\Delta}\right)^2}, \quad (5.13)$$

$$\text{т. е. } \lambda = f\left(\frac{r}{\Delta}\right);$$

$$\text{формула Шифринсона: } \lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_z}{d}\right)^{0,25}, \quad (5.14)$$

$$\text{т. е. } \lambda = f\left(\frac{\Delta_z}{d}\right).$$

Для турбулентного режима формула А. Д. Альтиуля (5.12) признана наиболее обобщённой и удобной для практических расчётов, так как вычисления по ней сводятся к элементарным алгебраическим действиям и дают надёжные результаты.

Согласно теории Альтиуля, при $2300 < Re < 20 \frac{d}{\Delta_z}$ второе слагаемое в формуле (5.12) значительно меньше первого, на потери напора влияет только число Рейнольдса (Re), и формула практически совпадает с формулой Блазуса (5.11):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re}\right)^{0,25} = \frac{0,316}{Re^{0,25}}; \quad \lambda = f(Re). \quad (5.15)$$

Как правило, эта зона сопротивления соответствует числам Рейнольдса до $Re = 2 \cdot 10^4$.

При числах Рейнольдса $20 \frac{d}{\Delta_z} < Re < 500 \frac{d}{\Delta_z}$ на потери напора оказывают влияние как число Re , так и относительная шероховатость $\frac{\Delta_z}{d}$, имеет место зона докватратичного сопротивления.

Коэффициент гидравлического сопротивления λ следует рассчитывать по формуле (5.12)

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_z}{d} \right)^{0,25}$$

Границы изменения чисел Рейнольдса $Re = 2 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^4$.

При числах Рейнольдса $Re > 500 \frac{d}{\Delta_z}$ имеет место зона квадратичного сопротивления, или движение вдоль шероховатых стенок. В формуле (5.12) первое слагаемое значительно меньше второго, им можно пренебречь. Потери напора по длине зависят только от относительной шероховатости $\frac{\Delta_z}{d}$, и формула (5.12) переходит в формулу Шифринсона (5.14):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_z}{d} \right)^{0,25}$$

Согласно графической зависимости А. Д. Альтшуля, для этой области сопротивления значения чисел Рейнольдса находятся в пределах $Re = 5 \cdot 10^4 - 10^6$.

Из выше изложенного следует, что понятие "*гидравлически гладкие*" и "*гидравлически шероховатые*" трубы относительное. Так, одна и та же труба с определённой шероховатостью может считаться гидравлически гладкой или шероховатой в зависимости от скорости движения (или числа Re), тогда для коэффициента гидравлического сопротивления λ выбирается соответствующая расчётная формула.

В представленной методике выбора расчётной зависимости коэффициента λ следует учитывать, что в трубах с большой шероховатостью при движении воды даже при малых числах Рейнольдса ($Re < 2300$) ламинарный режим движения невозможен.

5.3.2. Потери напора по длине в трубах с относительной шероховатостью

В гидравлических расчётах трубопроводов и других русел часто приходится встречаться с такой внутренней поверхностью трубы (бетонные, асбестовые, загрязнённые, водосточные трубы и им подобные) или иного русла (канала, лотка, жёлоба), для которых невозможно определить абсолютную шероховатость. В этом случае предложено коэффициент гидравлического сопротивления λ рассчитывать по формуле

$$\lambda = \frac{8g}{C^2}, \quad (5.16)$$

где C – коэффициент Шези.

Коэффициент Шези (C) зависит от многих факторов, в том числе от геометрических размеров и состояния внутренней поверхности трубы или другого русла. В практике расчётов коэффициент C можно принимать по таблицам или рассчитывать по специальным формулам. Наиболее простой формулой для определения коэффициента Шези является *формула Маннинга*:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (5.17)$$

где n или $1/n$ – коэффициенты шероховатости стенок трубы или русла по описанию, приводятся в таблицах. В данном учебном пособии значения коэффициентов n и $1/n$ приведены в табл. 7 (см. приложение);

R – гидравлический радиус, м. Согласно формуле (4.2), для круглой трубы гидравлический радиус $R = d/4$.

5.3.3. Потери напора по длине, выраженные через обобщённые параметры

В практике расчётов гидравлических систем, в частности трубопроводных систем, часто приходится рассчитывать потери напора по длине не через скорость (v), а через расход (Q), который известен или его нужно определить.

Преобразуем формулу (5.3) потерь по длине:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g},$$

а) выразим скорость через расход: $v^2 = \frac{Q^2}{\omega^2}$;

б) введём гидравлический радиус: $d = 4R$;

в) коэффициент гидравлического сопротивления (λ) запишем по формуле (5.16): $\lambda = \frac{8g}{C^2}$.

$$\text{Получаем: } h_l = \frac{8g}{C^2} \frac{l}{4R} \frac{Q^2}{\omega^2 2g} = \frac{Q^2}{C^2 \omega^2 R} l. \quad (5.18)$$

В формуле (5.18) обозначим $C^2 \omega^2 R = K^2$,

**Схема выбора теоретической формулы для расчёта
коэффициента гидравлического сопротивления λ**

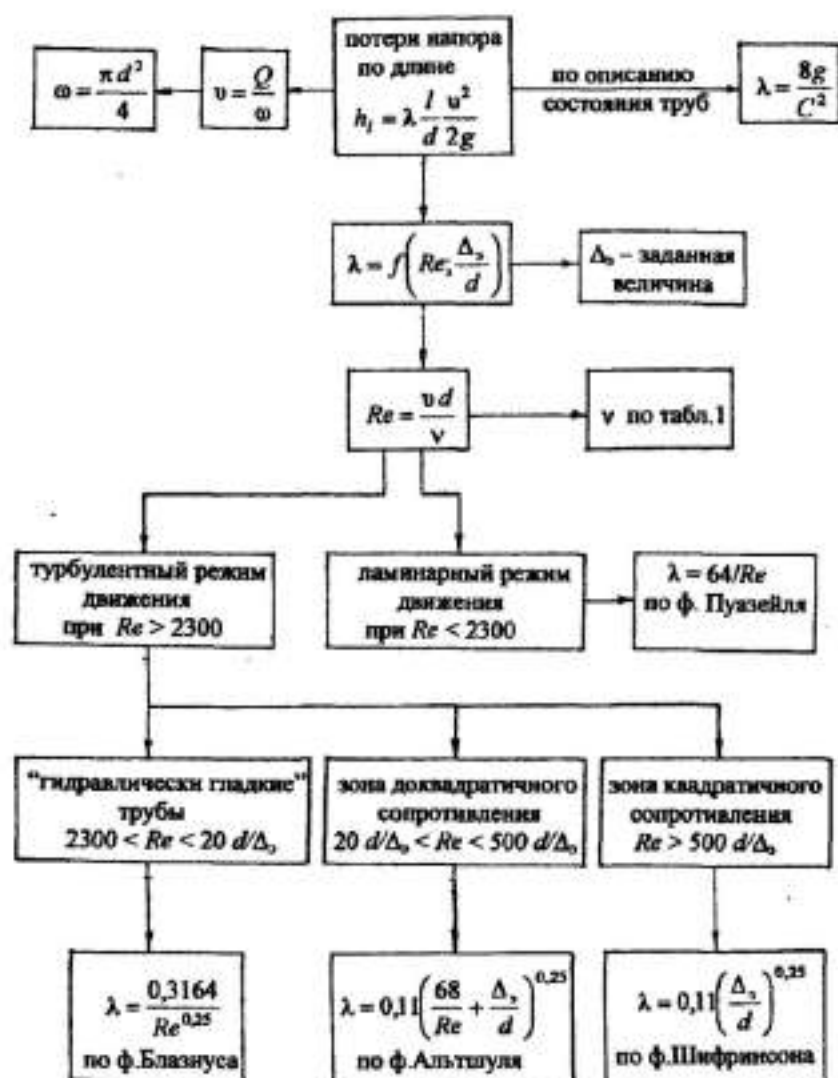


Рис. 5.1

где $K = C\omega\sqrt{R}$ называется модулем расхода, или расходной характеристикой, единица измерения $\text{м}^3/\text{с}$.

Формула (5.18) принимает вид:

$$h_f = \frac{Q^2}{K^2} l. \quad (5.19)$$

Для удобства практических расчётов величина $1/K^2$ обозначается через A :

$$A = \frac{1}{K^2}, \quad (5.20)$$

где A – удельное сопротивление (сопротивление единицы длины), единица измерения $\text{с}^2/\text{м}^6$.

Таким образом, потери напора по длине рассчитываются по формуле

$$h_f = A Q^2 l. \quad (5.21)$$

В приведённых формулах параметры K и A называются *обобщёнными параметрами*, значения которых приводятся в таблицах (см. приложение, табл. 8) для *нормальных водопроводных труб*, другое название – *водопроводные трубы в нормальных условиях*.

В табл. 9 (см. приложение) приведены значения удельного сопротивления A для расчёта трубопроводов при квадратичном законе сопротивления в соответствии с *абсолютной шероховатостью* (Δ) труб.

Обобщив все теоретические положения по расчёту потерь напора по длине (h_f), предлагаем схему для выбора теоретической расчётной формулы коэффициента гидравлического сопротивления λ (рис. 5.1).

ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОМЕХАНИКА

Задача прикладной гидромеханики – применение основных законов гидростатики и гидродинамики для практических и инженерных расчётов.

Глава 6

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

По методике расчёта трубопроводные системы делятся на две группы: простые и сложные.

Простые системы состоят, как правило, из одной трубы, возможно соединение нескольких труб сравнительно небольшой длины (примерно до 100 м), в которых учитываются все виды гидравлических сопротивлений, но, главное, с *постоянным расходом*.

Сложные системы состоят из труб разной длины и разных диаметров, соединённых по определённой гидравлической схеме, причём *расход жидкости* на каждом участке *различный* в соответствии с расходами потребителей. Эти системы, как правило, большой длины. Главными гидравлическими сопротивлениями являются потери по длине. Потери напора в местных сопротивлениях принимаются равными $(5 + 10) \%$ от потерь напора по длине, т. е. $\Sigma h_m = (0,05 + 0,1) h_f$.

6.1. Расчёт простых трубопроводных систем

При расчёте простых трубопроводов в зависимости от поставленной задачи, известных и определяемых параметров выделяют *три типа расчётов*.

1. Определение *напора (H) или давления (p)* при известных: расходе жидкости (Q), геометрических размерах трубопровода (длине l , диаметре d), местных сопротивлениях на трубопроводе.

2. Определение *расхода (Q)*, или пропускной способности трубопровода, при известных: действующем напоре (H) или давлении (p) в системе; геометрических размерах и установленных местных сопротивлениях.

3. Определение *геометрических размеров* трубопроводов (l , d), *характеристик местных сопротивлений* при известном расходе (Q), действующем напоре (H) или давлении (p). Наиболее трудоёмкой считается

задача по определению диаметра (d) трубопровода, так как такой расчёт проводится методом подбора и пересчёта нескольких вариантов.

Рассмотрим расчёт простого трубопровода. Здесь возможны *два случая: истечение жидкости в атмосферу и истечение под уровень.*

Расчёты простых трубопроводных систем основаны на использовании основного уравнения гидродинамики - уравнения Бернулли.

6.1.1. Расчёт простой трубопроводной системы с истечением жидкости в атмосферу

На рис. 6.1 представлена схема простого водопровода с водонапорной бапней, создающей постоянный напор H . Известны длина трубопровода l , диаметр d , местные сопротивления в виде входа в трубу, вентиля и двух колен (отводов).

Давление на поверхности воды в баке атмосферное (p_a), выход воды в конце трубы также в атмосферу (p_a).

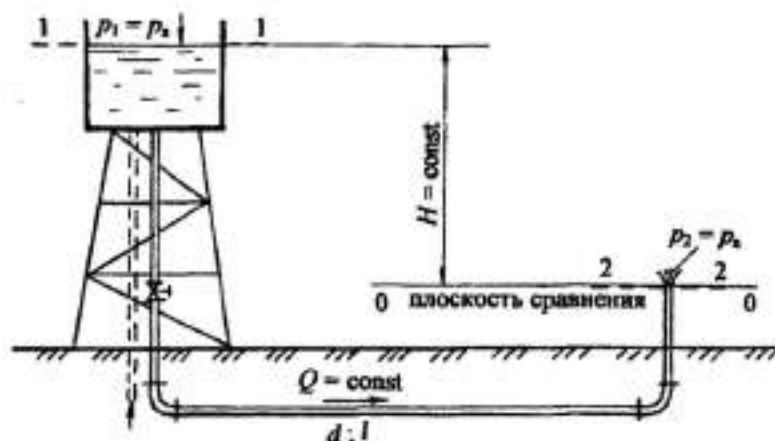


Рис. 6.1

В представленной схеме действующий напор H считается постоянным, уровень жидкости в напорном баке поддерживается на постоянном горизонте за счёт подачи воды (или другой жидкости) в бак, например, из скважины или от насосной установки, так, чтобы автоматически регулировался приток в бак, равным расходу жидкости в системе. Постоянная подача жидкости показана по трубопроводу, обозначенному пунктирной линией.

В дальнейших схемах трубопроводных систем приток жидкости в систему не обозначается, но всегда подразумевается *установившееся движение*, т. е. скорость движения жидкости в трубе не изменяется во времени.

Расчёт простой системы проведём путём применения уравнения Бернулли.

В разделе 4.5.7 представлена методика составления уравнения Бернулли, которая была использована при изучении приборов для измерения скорости и расхода жидкости (см. раздел 4.5.8). При составлении уравнения Бернулли для этих приборов не учитывались потери напора и гидравлических сопротивлений. В приведённых расчётах трубопроводных систем будут учтены все виды гидравлических сопротивлений.

Итак, при расчёте простой системы с истечением в атмосферу воспользуемся уравнением Бернулли (4.15). Согласно методике составления уравнения, выполним следующие пункты.

1. Выбираем два сечения: *одно сечение проводим по свободной поверхности в напорном баке* (башне), где скорость допустимо считать равной нулю (уровень жидкости постоянный, движения нет), *другое – на выходе жидкости из трубы*, где существует определённая скорость движения.

2. Сечения 1-1 и 2-2 нумеруем по направлению движения жидкости.

3. В выбранных сечениях учитываем абсолютное давление, т. е. давление, рассчитанное с учётом атмосферного: $p_1 = p_a$; $p_2 = p_a$.

4. *Плоскость сравнения 0 – 0 совместим с сечением 2 – 2*, тогда $z_1 = H$; $z_2 = 0$. Если бы плоскость сравнения совместили с сечением 1 – 1, тогда $z_1 = 0$; $z_2 = -H$. Помним, что отсчёты от плоскости сравнения вверх считаются положительными, вниз – отрицательными.

5. Записываем уравнение Бернулли (4.15) в общем виде и расписываем значение всех параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\Sigma-2}$$

$$z_1 = H;$$

$$z_2 = 0;$$

$$p_1 = p_a;$$

$$p_2 = p_a;$$

$$v_1 = 0;$$

$$v_2 = v; \quad \alpha_2 = 1,0;$$

для коэффициента α_2 предполагаем турбулентный режим в круглой трубе.

Получим:
$$H + \frac{p_a}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h_{\Sigma}.$$

В этом уравнении у потерь напора в гидравлических сопротивлениях (h_w) индекс 1-2 опускаем, поскольку вся расчётная схема системы входит между выбранными сечениями.

После сокращений получим:

$$H = \frac{v^2}{2g} + h_w. \quad (6.1)$$

Вывод: при истечении жидкости в атмосферу действующий напор затрачивается на создание скоростного напора и преодоление гидравлических сопротивлений.

Представим в уравнении (6.1) гидравлические сопротивления согласно формуле (5.1)

$$h_w = \Sigma h_r + h_l.$$

С учётом формул (5.2) и (5.3):

$$\Sigma h_r = \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g} \quad \text{и} \quad h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

Получим
$$H = \frac{v^2}{2g} + \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$

или
$$H = \frac{v^2}{2g} \left(1 + \Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d} \right). \quad (6.2)$$

Таким образом, по формуле (6.2) рассчитывается *действующий напор простой системы при истечении жидкости в атмосферу*.

Из формулы (6.2) можно получить расчётную формулу для расхода.

Скорость движения жидкости в трубе

$$v = \sqrt{\frac{1}{1 + \Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}} \sqrt{2gH}. \quad (6.3)$$

Расход $Q = \omega v$;

где ω – площадь живого сечения: $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$;

$$Q = \omega \sqrt{\frac{1}{1 + \Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}} \sqrt{2gH}. \quad (6.4)$$

В формуле (6.4) величина $\sqrt{\frac{1}{1 + \Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}}$ постоянная для заданной системы, влияет на величину расхода и называется "коэффициент расхода", обозначается $\mu_{\text{сист.}}$:

$$Q = \mu_{\text{сист.}} \omega \sqrt{2gH}. \quad (6.5)$$

Формула (6.5) является обобщённой формулой для расхода жидкости в простых системах, а значение коэффициента μ рассчитывается для каждой системы.

6.1.2. Расчёт простой трубопроводной системы при истечении жидкости под уровень

Истечением под уровень считается случай, когда жидкость поступает в резервуар, заполненный жидкостью, т. е. под уровень жидкости. Схема трубопровода с истечением под уровень может быть получена из предыдущей схемы (см. рис. 6.1), но выход жидкости покажем в другой открытый резервуар (рис. 6.2).

Для расчёта простой системы с истечением под уровень воспользуемся также уравнением Бернулли (4.15):

1. Выберем *два сечения* по свободным поверхностям жидкости в резервуарах, где скорости жидкости равны нулю.

2. Сечения 1-1 и 2-2 пронумеруем по направлению движения жидкости.

3. Учтём *абсолютные давления* в выбранных сечениях: $p_1 = p_a$; $p_2 = p_a$.

4. *Плоскость сравнения 0-0* совместим с сечением 2-2, тогда $z_1 = H$; $z_2 = 0$.

5. *Запишем уравнение Бернулли* в общем виде и покажем подстановку параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{ср.2}};$$

$$\begin{array}{ll} z_1 = H; & z_2 = 0; \\ p_1 = p_a; & p_2 = p_a; \\ v_1 = 0; & v_2 = 0. \end{array}$$

После подстановки параметров и сокращений получим:

$$H = h_w. \quad (6.6)$$

Вывод: в простой трубопроводной системе при истечении жидкости под уровень действующий напор затрачивается на преодоление гидравлических сопротивлений.

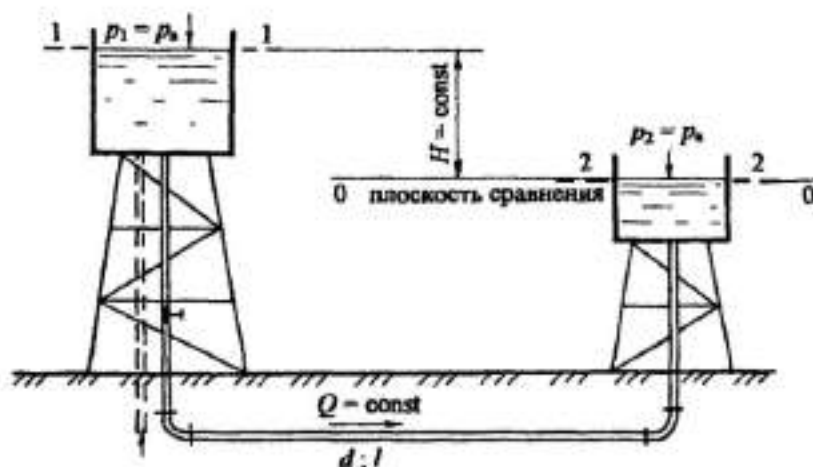


Рис. 6.2

С учётом формул (5.1); (5.2) и (5.3) формула (6.6) принимает вид:

$$H = \frac{v^2}{2g} \left(\Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d} \right). \quad (6.7)$$

Гидравлический расчёт двух рассмотренных систем аналогичен, а формулы (6.2) и (6.7) тождественны. Различие в формулах состоит в том, что при истечении в атмосферу единица в скобках учитывает единичную кинетическую энергию на выходе (или скоростной напор $v^2/2g$).

При истечении под уровень единица в скобках входит в сумму коэффициентов местных сопротивлений, а именно $\zeta_{\text{вых}} = 1,0$.

По аналогии с предыдущим выводом получим формулу для расхода:

$$Q = \omega \sqrt{\frac{1}{\Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}} \sqrt{2gH} \quad (6.8)$$

Обозначим:

$$\sqrt{\frac{1}{\Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}} = \mu_{\text{сист. под ур.}}$$

тогда

$$Q = \mu_{\text{сист. под ур.}} \omega \sqrt{2gH} \quad (6.9)$$

Формула (6.9) подтверждает обобщённость применения формулы (6.5).

На рис. 6.1 и 6.2 представлены схемы простых систем в самом общем виде. В технике имеют место различные схемы трубопроводных систем в виде водопроводов, нефтепроводов, газопроводов и им подобные. Движение жидкости происходит не только за счёт напорного бака (балли), разности напоров в резервуарах, но и за счёт давления, создаваемого насосом.

6.1.3. Методика расчёта простых трубопроводных систем

Расчёт простых систем *первого типа* по определению *напора (H)* или *давления (p)* включает следующие этапы.

1. Составляется уравнение Бернулли для характерных сечений.
2. Производится подстановка всех параметров *в буквенном выражении для определения неизвестного напора или давления*.
3. Определяется *скорость движения* жидкости в трубе при известном расходе.
4. Рассчитываются потери напора *в местных сопротивлениях* (Σh_i).
5. Определяются потери напора *по длине* (h_l) по схеме, представленной на рис. 5.1.
6. Производится *численный расчёт* напора или давления.

Простые системы *второго типа* по определению *расхода (Q)* рассчитываются в следующей последовательности:

1. Составляется уравнение Бернулли для выбранных сечений.
2. Производится подстановка входящих параметров и уравнение решается *в буквенном выражении относительно скорости движения жидкости*.

3. В расчётную формулу скорости входит коэффициент гидравлического сопротивления (λ), формула для которого выбирается в соответствии со значением числа Рейнольдса (Re). Но в формулу (4.20) для (Re) также входит неизвестная скорость, поэтому при заданной шероховатости трубы (Δ_s) при движении воды предполагается турбулентный режим, зона квадратичного сопротивления, для которой λ не зависит от числа Рейнольдса Re . Коэффициент λ рассчитывается по формуле Шифринсона (5.14), а затем определяется скорость движения жидкости.

4. Проверяется режим движения жидкости и зона сопротивления (см. схему на рис. 5.1). Если подтверждается квадратичная зона сопротивления, рассчитывается расход жидкости (Q).

Если режим движения и зона сопротивления не подтвердится, проводится повторный расчёт коэффициента λ в соответствии с числом Re по схеме (рис. 5.1).

5. После окончательного уточнения режима движения и области сопротивления определяется коэффициент λ и рассчитывается расход Q .

Как правило, при движении воды в шероховатых трубах имеет место турбулентный режим, зона квадратичного сопротивления.

Расчёт простых систем *третьего типа* по определению длины или значений коэффициентов местных сопротивлений различных устройств (кранов, задвижек, диафрагм и им подобных) не представляет трудности.

Составляется уравнение Бернулли для характерных сечений, затем оно преобразуется в буквенное выражение для расчёта предельной длины трубопровода или для определения коэффициента местного сопротивления какого-либо устройства. В буквенное выражение подставляется значение заданных или рассчитанных параметров.

Трудной представляется задача по определению диаметра трубопровода (d) при заданных расходе, напоре и длине (Q , H и l).

Наиболее просто такую задачу решить графически. Расчёт проводим путём нескольких приближённых решений.

Как и ранее, предполагаем квадратичную область сопротивления, рассчитывая коэффициент λ по формуле (5.14) при заданной шероховатости Δ_s , задаём ряд значений диаметра (d_1 ; d_2 ; d_n).

Пользуясь формулой для расхода в буквенном выражении, например формулой (6.4):

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{1}{1 + \sum \zeta + \lambda \frac{l}{d}}} \sqrt{2gH},$$

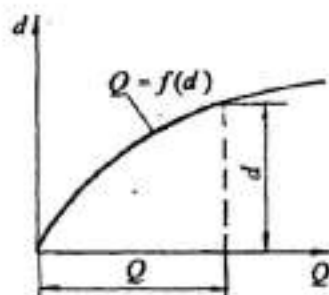


Рис. 6.3

Для ориентировочного определения наилучшего диаметра трубопровода (d) при заданном расходе (Q) можно пользоваться также формулой В. Г. Лобачёва:

$$d = (0,8 - 1,2) Q^{0,42}.$$

На практике для расчёта диаметра трубопровода пользуются **оптимальными** значениями скоростей: при движении в водопроводных системах скорость $v = (0,8 - 1,2)$ м/с, реже до 1,5 м/с; для шахтных водоотливных трубопроводов $v = (2,0 - 2,5)$ м/с.

Следует отметить, что для технико-экономических расчётов по определению оптимальных значений диаметров трубопроводов следует пользоваться специальной литературой и таблицами.

Ниже представлены примеры расчётов различного вида простых систем. Расчёты включают определение основных параметров движения, построения пьезометрической линии и графическое определение потерь напора в системе.

просчитываем несколько вариантов значений расхода ($Q_1; Q_2; \dots Q_n$) для принятых диаметров и строим графическую зависимость $Q = f(d)$. Эта зависимость квадратичная и в общем виде представлена на рис. 6.3.

По графику для заданного значения расхода Q определяется диаметр трубопровода d .

6.2. Примеры решения задач по теме: "Расчёт простых трубопроводных систем"

Задача 6.2.1 С помощью насоса по трубе диаметром $d = 50$ мм и длиной $l = 70$ м нефть подаётся в закрытый резервуар на высоту $H = 15$ м. Считать $H = \text{const}$.

Определить показание мановакуумметра ($p_{\text{мв}}$), установленного на поверхности нефти в закрытом резервуаре, если показание манометра после насоса $p_{\text{ман}} = 1,3$ ат. Расход нефти $Q = 1,2$ л/с, плотность нефти $\rho_n = 900$ кг/м³, относительная вязкость по Энглеру $\eta' = 4,0$. В системе установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 40^\circ$ и два колена с коэффициентом сопротивления $\zeta_{\text{кол}} = 0,8$ (рис. 6.4).

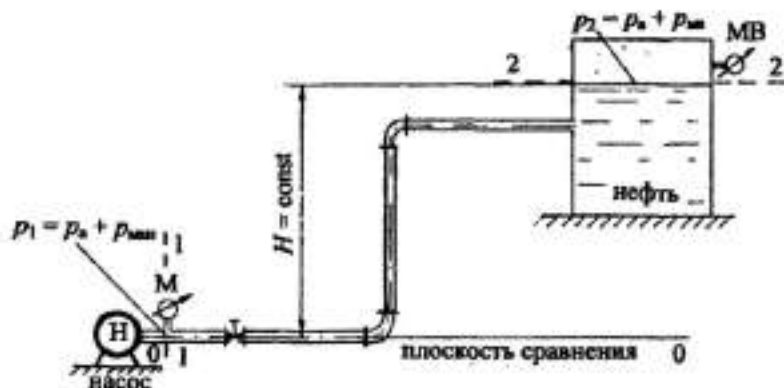


Рис. 6.4

Решение. Представленная трубопроводная система относится к *первому типу* простых систем.

Следует вспомнить из главы 1 (задача 1.5.3), что *мановакуумметр* — это прибор, который может измерять, как манометрическое (избыточное) давление, так и вакуум. При решении задачи давление на поверхности нефти будем обозначать $p_{\text{мв}}$. Если при решении задачи значение давления получится положительным, значит, мановакуумметр работает, как манометр; отрицательное значение давления означает, что мановакуумметр работает, как вакуумметр.

Для определения показания мановакуумметра воспользуемся уравнением Бернулли. Согласно методике составления уравнения (см. раздел 4.5.7):

1. Выбираем *два сечения*: *одно* - в месте установки манометра, это сечение проводим нормально к направлению движения жидкости, где скорость равна скорости движения нефти в трубе - v ; *другое* - по свободной поверхности в резервуаре, где давление определяется по мановакуумметру, а скорость равна нулю.

2. Сечения 1-1 и 2-2 нумеруем по направлению движения жидкости, чтобы в уравнении потери напора в гидравлических сопротивлениях учитывались со знаком "+".

3. В выбранных сечениях принимаем абсолютное давление, т. е. с учётом атмосферного: $p_1 = p_a + p_{\text{ман}}$; $p_2 = p_a + p_{\text{ман}}$.

4. Плоскость сечения 0-0 проводим через ось первого сечения: $z_1 = 0$; $z_2 = H$.

5. Записываем уравнение Бернулли (4.15) в общем виде и производим подстановку всех параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{вс-2}};$$

$$\begin{aligned} z_1 &= 0; & z_2 &= H; \\ p_1 &= p_a + p_{\text{ман}}; & p_2 &= p_a + p_{\text{ман}}; \\ v_{1 \text{ сеч.}} &= v; \alpha_1 = 2,0; & v_{2 \text{ сеч.}} &= 0. \end{aligned}$$

Движущаяся жидкость - нефть относится к вязким жидкостям, поэтому предполагаем ламинарный режим (коэффициент $\alpha_1 = 2,0$). В процессе решения задачи режим движения нефти будет проверен.

Подставляем все параметры в уравнение Бернулли:

$$\frac{p_a}{\rho_a g} + \frac{p_{\text{ман}}}{\rho_a g} + \frac{2v^2}{2g} = H + \frac{p_a}{\rho_a g} + \frac{p_{\text{ман}}}{\rho_a g} + h_w.$$

После сокращений и преобразования уравнения Бернулли получим:

$$\frac{p_{\text{ман}}}{\rho_a g} = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho_a g} + \frac{2v^2}{2g} - H - h_w. \quad (6.10)$$

Рассчитаем все слагаемые в уравнении (6.10):

$$\frac{p_{\text{ман}}}{\rho_a g} = \frac{1,3 \cdot 98 \cdot 10^3}{900 \cdot 9,8} = 14,44 \text{ м.}$$

Скорость движения нефти в трубе (v) рассчитываем через расход (Q):

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2};$$

расход Q и диаметр d переводим: $Q = 1,2 \text{ л/с} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; $d = 0,05 \text{ м}$;

$$v = \frac{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,05^2} = 0,61 \text{ м/с};$$

скоростной напор $\frac{v^2}{2g} = \frac{0,61^2}{2 \cdot 9,8} = 0,019 \text{ м}$ (достаточно малая величина).

Рассчитаем потери напора в гидравлических сопротивлениях по формуле (5.1)

$$h_w = \Sigma h_r + h_l;$$

потери напора в местных сопротивлениях по формуле (5.2)

$$\Sigma h_r = \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g},$$

где $\Sigma \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений. Учитываем потери напора в двух коленах и в пробковом кране:

$$\Sigma \zeta = 2 \zeta_{\text{кол.}} + \zeta_{\text{кр.}} + \zeta_{\text{мех.}};$$

по табл. 4 (см. приложение): $\zeta_{\text{кр.}} = 17,3$ при угле закрытия $\alpha = 40^\circ$, $\zeta_{\text{мех.}} = 1,0$, тогда:

$$\Sigma \zeta = 2 \cdot 0,8 + 17,3 + 1,0 = 19,9;$$

получим

$$\Sigma h_r = 19,9 \cdot 0,019 = 0,38 \text{ м.}$$

Потери напора по длине определяем согласно формуле (5.3):

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

Для выбора расчётной формулы коэффициента гидравлического сопротивления λ (см. схему, рис. 5.1) определим режим движения жидкости по критерию Рейнольдса (см. формулу 4.20):

$$Re = \frac{v d}{\nu}$$

В формулу (4.20) входит коэффициент кинематической вязкости ν . Для расчёта этого коэффициента воспользуемся значением относительной вязкости в градусах Энглера ($^{\circ}E$) (см. физические свойства жидкости). По формуле Уббелюде:

$$\nu = \left(0,0731^{\circ}E - \frac{0,0631}{^{\circ}E} \right) \cdot 10^{-4};$$

$$\nu = \left(0,0731 \cdot 4,0 - \frac{0,0631}{4,0} \right) \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2/\text{с}; \quad \nu = 0,277 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Получим:
$$Re = \frac{0,61 \cdot 0,05}{0,277 \cdot 10^{-4}} = 1101 < Re_{кр} = 2300.$$

Так как число Re меньше критического значения, заключаем, что имеет место *ламинарный режим движения нефти*. Принятое значение коэффициента $\alpha_1 = 2,0$ верно.

Для ламинарного режима коэффициент гидравлического сопротивления λ рассчитывается по формуле (5.8)

$$\lambda = \frac{64}{Re}.$$

Рассчитаем потери напора по длине:

$$h_l = \frac{64}{Re} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}; \quad h_l = \frac{64}{1101} \cdot \frac{70}{0,05} \cdot 0,019 = 1,54 \text{ м}.$$

Потери напора в гидравлических сопротивлениях:

$$h_w = 0,38 + 1,54 = 1,92 \text{ м}.$$

Подставим значение всех слагаемых в преобразованное уравнение Бернулли (6.10):

$$\frac{p_{\text{из}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} = 14,44 + 0,019 \cdot 2 - 15,0 - 1,92 = -2,44 \text{ м}.$$

Получили отрицательное значение, значит, мановакуумметр работает как вакуумметр. Величина вакуума

$$p_{\text{ва}} = p_{\text{вак}} = 2,44 \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} g = 2,44 \cdot 900 \cdot 9,8 = 21521 \text{ Па} \text{ или } p_{\text{вак}} = 0,22 \text{ ат.}$$

Ответ. Показание мановакуумметра соответствует вакуумметрическому давлению: $p_{\text{вак}} = p_{\text{вак}} = 0,22 \text{ ат.}$

Задача 6.2.2. Вода из закрытого резервуара *A* поступает в открытый резервуар *B* при пропускной способности системы $Q = 15 \text{ л/с}$ по трубам: $d_1 = 75 \text{ мм}$; $l_1 = 8 \text{ м}$ и $l_2 = 12 \text{ м}$; $d_2 = 100 \text{ мм}$ и $l_3 = 15 \text{ м}$. Напоры воды в резервуарах постоянны относительно оси трубы: $H_1 = 1,5 \text{ м}$; $H_2 = 3,5 \text{ м}$ (рис. 6.5).

Определить показание манометра ($p_{\text{ман}}$) на поверхности воды в закрытом резервуаре, а также соответствующий манометрический напор ($H_{\text{ман}}$).

Принять абсолютную шероховатость труб: $\Delta_1 = 0,5 \text{ мм}$; $\Delta_2 = 0,2 \text{ мм}$. Учесть местные сопротивления в системе: на входе в первую трубу; в пробковом кране при угле закрытия $\alpha = 30^\circ$; при внезапном расширении и на выходе из второй трубы.

Движение воды в системе считать установившемся, т.е. $Q = \text{const}$. Построить линию полного напора (напорную линию), пьезометрическую линию, показать эпюру потерь напора.

Решение. Представленная схема (см. рис. 6.5) относится к простым трубопроводным системам *первого типа с истечением под уровень*.

Для определения избыточного (манометрического) давления ($p_{\text{ман}}$) на поверхности воды в резервуаре *A* воспользуемся уравнением Бернулли (см. методику в разделе 4.5.7):

1. Выберем *два сечения* по свободным поверхностям в резервуарах, где скорость допустимо считать равной нулю.

2. Сечения 1-1 и 2-2 пропумеруем по направлению движения воды.

3. В выбранных сечениях учтём абсолютное давление: $p_1 = p_{\text{a}} + p_{\text{ман}}$; $p_2 = p_{\text{a}}$.

4. Плоскость сравнения совместим с осью трубы, тогда $z_1 = H_1$; $z_2 = H_2$.

5. Запишем уравнение Бернулли (4.15) в общем виде и решим его:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{m-2};$$

$$\begin{aligned} z_1 &= H_1; & z_2 &= H_2; \\ p_1 &= p_a + p_{\text{ман}}; & p_2 &= p_a; \\ v_{1\text{ сеч.}} &= 0; & v_{2\text{ сеч.}} &= 0; \end{aligned}$$

после подстановки параметров и сокращений получим:

$$H_1 + \frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = H_2 + h_w, \text{ откуда } \frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = H_2 - H_1 + h_w. \quad (6.11)$$

В формуле (6.11) следует определить величину потерь напора в гидравлических сопротивлениях (h_w). Ввиду того, что по условию задачи необходимо *представить графически* распределение напора по длине системы, запишем потери напора по порядку по направлению движения воды:

$$h_w = h_{\text{эк}} + h_{f_1} + h_{\text{кр}} + h_{f_2} + h_{\text{вп}} + h_{f_3} + h_{\text{вых}}. \quad (6.12)$$

Все потери напора в гидравлических сопротивлениях пропорциональны скоростному напору, поэтому потери напора в трубе диаметром d_1 определим с учётом скоростного напора $\frac{v_1^2}{2g}$, а в трубе диаметром d_2 - $\frac{v_2^2}{2g}$.

Скорости v_1 и v_2 рассчитаем через расход Q по формулам:

$$v_1 = \frac{Q}{\omega_1} = \frac{4Q}{\pi d_1^2} \text{ и } v_2 = \frac{Q}{\omega_2} = \frac{4Q}{\pi d_2^2};$$

при подстановке данных учитываем: $Q = 15 \text{ л/с} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$;
 $d_1 = 75 \text{ мм} = 0,075 \text{ м}$; $d_2 = 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м}$.

После вычислений получим скорости: $v_1 = 3,4 \text{ м/с}$; $v_2 = 1,9 \text{ м/с}$;
 соответственно скоростные напоры: $\frac{v_1^2}{2g} = 0,6 \text{ м}$; $\frac{v_2^2}{2g} = 0,2 \text{ м}$.

Рассчитаем потери напора в *местных сопротивлениях*.

Потери напора *на входе в трубу* диаметром d_1 :

$$h_{\text{эк}} = \zeta_{\text{эк}} \frac{v_1^2}{2g}, \text{ принимая } \zeta_{\text{эк}} = 0,5 \text{ по табл. 4 (см. приложение),}$$

получим $h_{\text{эк}} = 0,5 \cdot 0,6 = 0,3 \text{ м}$.

Потери напора *в пробковом кране*:

$h_{\text{кр.}} = \zeta_{\text{кр.}} \frac{v_1^2}{2g}$, принимая $\zeta_{\text{кр.}} = 5,47$ при $\alpha = 30^\circ$ по табл. 4 (см. приложение), получим $h_{\text{кр.}} = 5,37 \cdot 0,6 = 3,3$ м.

Потери напора *при внезапном расширении*:

$h_{\text{в.р.}} = \zeta_{\text{в.р.}} \frac{v_2^2}{2g}$, где $\zeta_{\text{в.р.}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2 = 0,6$ согласно табл. 4 (см. приложение), тогда $h_{\text{в.р.}} = 0,6 \cdot 0,2 = 0,12$ м.

Потери напора *на выходе из трубы* в резервуар В:

$h_{\text{вых.}} = \zeta_{\text{вых.}} \frac{v_2^2}{2g}$, принимая $\zeta_{\text{вых.}} = 1,0$ по табл. 4 (см. приложение), получим $h_{\text{вых.}} = 0,2$ м.

Переходим к определению *потерь напора по длине* по формуле (5.3):

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

Для труб с диаметрами d_1 и d_2 следует рассчитать коэффициенты гидравлического сопротивления λ_1 и λ_2 .

Выбор расчётной зависимости коэффициента λ зависит *от режима движения жидкости и шероховатости труб* (см. схему на рис. 5.1).

Рассчитаем числа Рейнольдса для каждой трубы по формуле (4.20):

$$Re_1 = \frac{v_1 d_1}{\nu}; \quad Re_2 = \frac{v_2 d_2}{\nu},$$

значение коэффициента кинематической вязкости воды (ν) принимаем по табл.1 (см. приложение), для воды $\nu = 1,008 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Получим $Re_1 = 255000$; $Re_2 = 190000$, следовательно, режим движения воды турбулентный, так как Re_1 и Re_2 больше $Re_{\text{кр.}} = 2300$.

Рассчитаем граничные значения для чисел Re , чтобы установить область сопротивления для обеих труб при турбулентном режиме:

$$20 \frac{d_1}{\Delta_1} = 20 \frac{75}{0,5} = 3000; \quad 20 \frac{d_2}{\Delta_2} = 20 \frac{100}{0,2} = 10000;$$

$$500 \frac{d_1}{\Delta_1} = 500 \frac{75}{0,5} = 75000; \quad 500 \frac{d_2}{\Delta_2} = 500 \frac{100}{0,2} = 250000.$$

Для *первой трубы* $Re_1 = 255000 > 500 \frac{d_1}{\Delta_1}$, значит имеет место зона *квадратичного сопротивления*, коэффициент λ рассчитывается по формуле Шифринсона (5.14):

$$\lambda_1 = 0,11 \left(\frac{\Delta_1}{d_1} \right)^{0,25}; \quad \lambda_1 = 0,11 \left(\frac{0,5}{75} \right)^{0,25} = 0,032.$$

Потери напора по длине на первом и втором участках согласно формуле (5.3):

$$h_{\lambda_1} = 0,032 \frac{8,0}{0,075} 0,6 = 2,0 \text{ м}; \quad h_{\lambda_2} = 0,032 \frac{12,0}{0,075} 0,6 = 3,0 \text{ м}.$$

Для *второй трубы* $20 \frac{d_2}{\Delta_2} < Re = 190000 < 500 \frac{d_2}{\Delta_2}$, имеет место зона *доквадратичного сопротивления*, коэффициент λ рассчитываем по формуле Альтшуля (5.12) (см. схему рис. 5.1):

$$\lambda_2 = 0,11 \left(\frac{68}{Re_2} + \frac{\Delta_2}{d_2} \right)^{0,25}; \quad \lambda_2 = 0,024.$$

Потери напора по длине на третьем участке:

$$h_{\lambda_3} = \lambda_2 \frac{l_3}{d_2} \frac{v_2^2}{2g}; \quad h_{\lambda_3} = 0,024 \frac{15,0}{0,1} 0,2 = 0,7 \text{ м}.$$

Подставим значения всех потерь напора в формулу (6.12):

$$h_w = 0,3 + 2,0 + 3,3 + 3,0 + 0,12 + 0,7 + 0,2 = 9,62 \text{ м}.$$

После подстановки слагаемых в формулу (6.11) получим:

$$\frac{P_{\text{ман}}}{\rho g} = 3,5 - 1,5 + 9,62 = 11,62 \text{ м},$$

значит соответствующий манометрический напор $H_{\text{ман}} = 11,62 \text{ м}$.

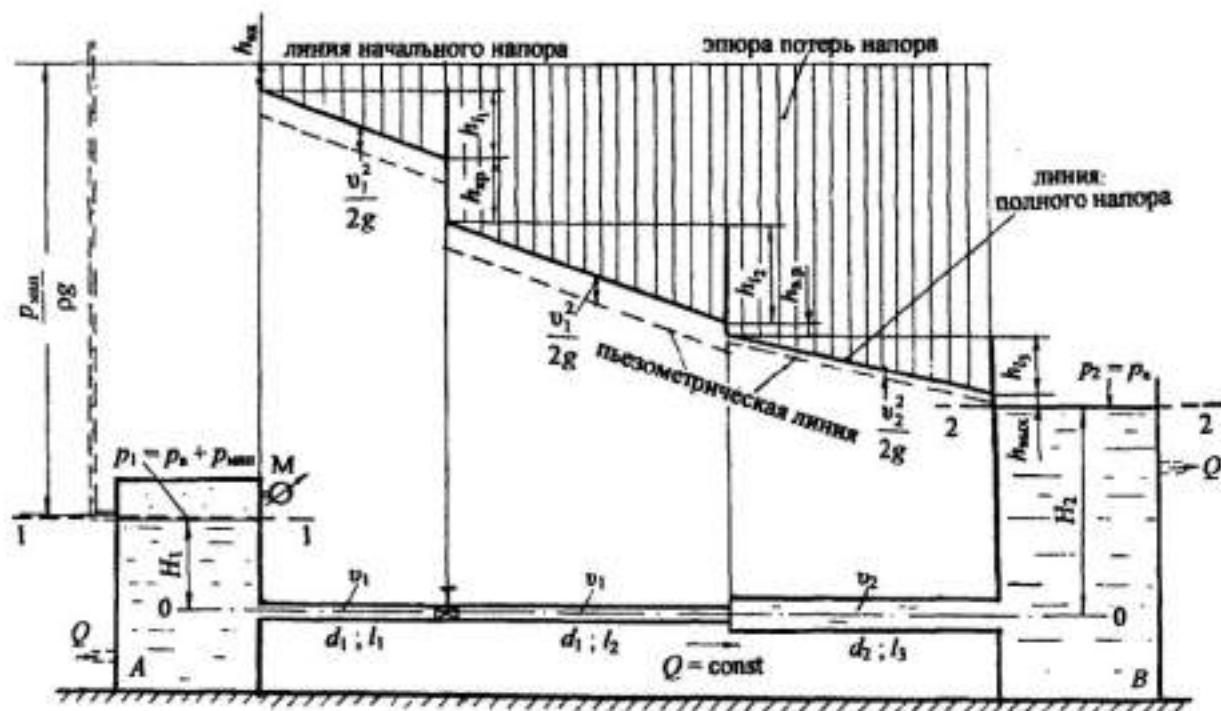


Рис. 6.5

Представим манометрическое давление ($p_{\text{ман}}$) в кПа:

$$p_{\text{ман}} = 11,62 \cdot \rho g = 11,62 \cdot 10^3 \cdot 9,8 = 113,9 \cdot 10^3 \text{ Па} = 113,9 \text{ кПа.}$$

Манометрическое давление в атмосферах $p_{\text{ман}} = 1,16 \text{ ат.}$

Переходим к построению линии полного напора.

От уровня жидкости в резервуаре *A* пунктиром покажем пьезометр, показание которого соответствует величине $p_{\text{ман}}/(\rho g)$ (см. главу 2, задачи 2.3.6; 2.3.8). По уровню жидкости в пьезометре проведём *горизонтальную линию начального напора*. До линии начального напора проводим *вертикальные линии* по характерным сечениям трубопровода: входа в трубу; крана; внезапного расширения; выхода из трубы (рис. 6.5).

Откладываем по порядку, начиная от линии начального напора, по вертикали потери напора:

- на входе в виде скачка $h_{\text{вх}} = 0,3 \text{ м}$;
- по длине первого участка в виде наклонной прямой $h_1 = 2,0 \text{ м}$;
- в кране в виде скачка $h_{\text{кр}} = 3,3 \text{ м}$;
- по длине второго участка в виде наклонной прямой $h_2 = 3,0 \text{ м}$;
- при внезапном расширении в виде скачка $h_{\text{в.р.}} = 0,12 \text{ м}$;
- по длине третьего участка $h_3 = 0,7 \text{ м}$;
- на выходе в резервуар *B* также в виде скачка $h_{\text{вых}} = 0,2 \text{ м}$.

Линия полного напора должна закончиться на свободной поверхности в резервуаре *B* (на рис. 6.5 масштаб не выдержан).

Пьезометрическую линию проводим ниже линии полного напора на величину $\frac{v_1^2}{2g} = 0,6 \text{ м}$ для трубы диаметром d_1 и на величину $\frac{v_2^2}{2g} = 0,2 \text{ м}$ для трубы диаметром d_2 . Пьезометрическая линия показана пунктиром.

Следует обратить внимание, что при внезапном расширении полный напор падает, а пьезометрический напор повышается.

Строим эпюру потерь напора. Показываем *вертикальные штриховые линии* от линии начального напора до линии полного напора. Каждая вертикальная штриховая линия соответствует потерям напора от начала трубопровода до выбранного сечения. Графическое представление распределения напоров закончено.

Ответ: показание манометра $p_{\text{ман}} = 1,16 \text{ ат.}$, манометрический напор, соответствующий показанию манометра $H_{\text{ман}} = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = 11,6 \text{ м.}$

На примерах задач 6.2.1 и 6.2.2 рассмотрен расчёт простых трубопроводных систем первого типа: в задаче 6.2.1 определялось давление, а в задаче 6.2.2 – действующий напор и построение пьезометрической линии.

Ниже предлагается расчёт простой трубопроводной системы *второго типа* с определением пропускной способности (расхода жидкости) системы с истечением в атмосферу.

Задача 6.2.3. С помощью насоса вода поднимается на высоту $H = 15$ м с истечением в атмосферу. Определить пропускную способность (расход) системы, если показание манометра, установленного после насоса, $p_{\text{ман}} = 1,6$ ат; длина трубы $l = 80$ м; диаметр трубы $d = 100$ мм с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,5$ мм. На трубопроводе установлены: задвижка Лудло со степенью закрытия $a/d = 3/4$ и три колена.

Принять плотность воды $\rho = 10^3$ кг/м³, кинематический коэффициент вязкости $\nu = 1,008 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Движение воды считать установившимся, т. е. $Q = \text{const}$ (рис. 6.6).

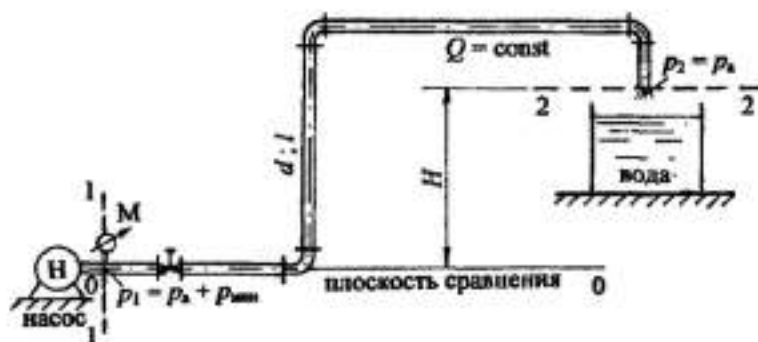


Рис. 6.6

Решение. Для определения расхода (Q) воспользуемся уравнением Бернулли (4.15) по принятой методике (см. раздел 4.5.7):

1. **Выбираем два сечения**, где известны давления, т. е. в месте установки манометра и на выходе воды в атмосферу. В этих сечениях скорости одинаковы ($v = \text{const}$), так как не изменяется диаметр трубопровода и пропускная способность. Сечения проводим нормально к направлению движения жидкости, т. е. трубу рассекаем нормальной плоскостью.

2. **Сечения нумеруем по направлению движения жидкости**: 1-1 - в месте установки манометра, 2-2 - на выходе воды в атмосферу.

3. В выбранных сечениях *учитываем абсолютное давление*, т. е. давление, рассчитанное с учётом атмосферного: $p_1 = p_a + p_{\text{ман}}$; $p_2 = p_a$.

4. *Плоскость сравнения 0-0* проводим через ось первого сечения, тогда $z_1 = 0$; $z_2 = H$.

5. Записываем уравнение Бернулли (4.15) в общем виде и делаем подстановку параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{м. 2}};$$

$$\begin{aligned} z_1 &= 0; & z_2 &= H; \\ p_1 &= p_a + p_{\text{ман}}; & p_2 &= p_a; \\ v_1 &= v_2 = v = \text{const.} \end{aligned}$$

После преобразований и сокращений получим:

$$\frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = H + h_w. \quad (6.13)$$

Прочитаем преобразованное уравнение Бернулли: напор, создаваемый насосом, идёт на подъём воды на высоту H и преодоление гидравлических сопротивлений h_w .

Согласно формулам (5.1), (5.2) и (5.3), представляем гидравлические сопротивления:

$$\begin{aligned} h_w &= \Sigma h_r + h_f; \\ \Sigma h_r &= \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g} \quad \text{и} \quad h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}. \end{aligned}$$

Из формулы (6.13) запишем потери напора в гидравлических сопротивлениях:

$$h_w = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} - H$$

$$\text{или} \quad \frac{v^2}{2g} \left(\Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} - H,$$

отсюда скорость движения воды в трубе:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}}} \sqrt{2g \left(\frac{P_{\text{max}}}{\rho g} - H \right)}. \quad (6.14)$$

Рассчитав скорость по формуле (6.14), определим расход: $Q = v\omega$. Для расчёта скорости в формуле (6.14) нужно определить сумму коэффициентов местных сопротивлений для задвижки и трёх колен ($\Sigma \zeta$) и коэффициент гидравлического сопротивления (λ).

Сумма коэффициентов местных сопротивлений:

$$\Sigma \zeta = \zeta_{\text{задв}} + 3\zeta_{\text{кол}}.$$

По табл. 4, 5 (см. приложение): $\zeta_{\text{задв}} = 17,0$; $\zeta_{\text{кол}} = 0,39$ при диаметре $d = 100$ мм, получим $\Sigma \zeta = 18,17$.

Для выбора расчётной формулы коэффициента гидравлического сопротивления λ кроме абсолютной шероховатости трубы (Δ) необходимо определить режим движения жидкости по критерию Рейнольдса (Re) (см. формулу (4.20)).

В формулу (4.20) также входит неизвестная скорость (v), поэтому при заданной шероховатости (Δ) предполагаем турбулентный режим, зону квадратичного сопротивления, для которой λ не зависит от Re , и рассчитываем коэффициент λ по формуле Шифринсона (5.14), затем определяем скорость движения воды.

После расчёта скорости нужно проверить режим движения. Если подтвердится квадратичная зона сопротивления, рассчитаем расход. Если режим движения и зона сопротивления не подтвердится, проводим повторный расчёт коэффициента λ в соответствии с числом Re .

Итак, *предполагаем* для трубы диаметром $d = 100$ мм с шероховатостью $\Delta = 0,5$ мм *турбулентный режим, зону квадратичного сопротивления*. Коэффициент λ рассчитаем по формуле (5.14):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}; \quad \lambda = 0,11 \left(\frac{0,5}{100} \right)^{0,25} = 0,029.$$

Подставляем все данные в формулу (6.14).

Для удобства расчётов:

$$\frac{P_{\text{max}}}{\rho g} = \frac{1,6 \cdot 98 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 9,8} = 16 \text{ м}.$$

Рассчитаем скорость движения воды по формуле (6.14):

$$v = \sqrt{\frac{1}{18,17 + 0,029 \frac{80}{0,1}}} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1} = 0,69 \text{ м/с}.$$

Рассчитаем критерий Re по формуле (4.20):

$$Re = \frac{vd}{\nu}; \quad Re = \frac{0,69 \cdot 0,1}{1,008 \cdot 10^{-6}} = 68452.$$

Сравнивая число Рейнольдса (Re) для потока воды с критическим ($Re_{кр}$), заключаем, что $Re = 68452 > Re_{кр} = 2300$, значит, режим движения турбулентный.

По схеме (см. рис. 5.1) определим граничные значения чисел Re для установления зоны сопротивления при турбулентном режиме:

$$20 \frac{d}{\Delta} = 20 \frac{100}{0,5} = 4000;$$

$$500 \frac{d}{\Delta} = 500 \frac{100}{0,5} = 100000.$$

Значение числа Рейнольдса (Re) входит в интервал:

$$20 \frac{d}{\Delta} < Re = 68452 < 500 \frac{d}{\Delta},$$

значит, *квадратичная зона сопротивления не подтвердилась*, имеет место турбулентный режим, *зона доквадратичного сопротивления*, для которой коэффициент λ рассчитываем по формуле А. Д. Альтшуля (5.12):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25};$$

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{68452} + \frac{0,5}{100} \right)^{0,25} = 0,031.$$

Снова рассчитаем скорость (v) при значении $\lambda = 0,031$:

$$v = \sqrt{\frac{1}{18,17 + 0,031 \frac{80}{0,1}}} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1} = 0,676 \text{ м/с};$$

далее

$$Re = \frac{0,676 \cdot 0,1}{1,008 \cdot 10^{-6}} = 67044;$$

теперь

$$20 \frac{d}{\Delta} < Re = 67044 < 500 \frac{d}{\Delta}.$$

Доквадратичная зона сопротивления подтвердилась.
Рассчитаем расход

$$Q = v \omega = \frac{\pi d^2}{4} v;$$

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} \cdot 0,676 = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} = 5,3 \text{ л/с}.$$

Ответ: пропускная способность системы $Q = 5,3 \text{ л/с}$.

Особыми случаями простого трубопровода являются *расчёт высоты установки насоса и расчёт сифона*.

В задаче 6.2.4 приводится *расчёт высоты установки центробежного насоса* (рис. 6.7). Центробежный насос имеет всасывающий трубопровод, по которому насос засасывает жидкость из водохранилища, бассейна, зумпфа и им подобных ёмкостей, и нагнетательный трубопровод, по которому жидкость под действием избыточного давления, создаваемого насосом, транспортируется по трубопроводу и поднимается на определённую высоту. Примеры расчёта нагнетательных систем приведены в задачах 6.2.1 и 6.2.3.

Движение жидкости во всасывающем трубопроводе происходит под действием вакуума. Наибольшая величина вакуума имеет место непосредственно у входа в насос перед рабочим колесом.

Задача 6.2.4. Определить высоту установки центробежного насоса ($H_{\text{нас}}$), который отсасывает воду из зумпфа больших размеров, если диаметр всасывающего трубопровода $d = 100$ мм, длина $l = 25$ м; вакуумметрическое давление на входе в насос $p_{\text{вх}} = 0,6$ ат. Труба водопроводная несколько загрязнённая имеет водозаборную сетку с обратным клапаном и одно колено с углом поворота $\alpha = 90^\circ$. Насос должен обеспечить постоянную подачу воды $Q = 9,0$ л/с (см. рис. 6.7).

Решение. За высоту установки центробежного насоса ($H_{\text{нас}}$) принимается удаление вала центробежного насоса от свободной поверхности воды в зумпфе.

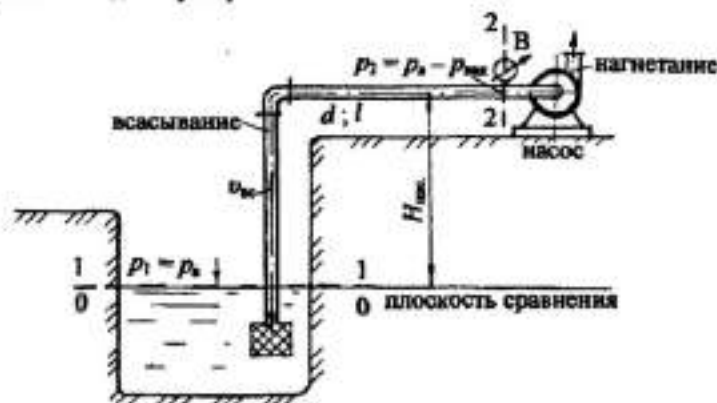


Рис. 6.7

Для определения $H_{\text{нас}}$ воспользуемся уравнением Бернулли (4.15).

1. Выберем **два сечения**: одно по свободной поверхности в зумпфе, другое — на входе в насос, где установлен вакуумметр, причём нормально к направлению движения потока воды.

2. Сечения **прономеруем по направлению движения жидкости**: 1-1 — по свободной поверхности воды в зумпфе, 2-2 — в месте установки вакуумметра.

3. В выбранных сечениях учтём **абсолютное давление**: $p_1 = p_2$; $p_2 = p_1 - p_{\text{вх}}$.

4. **Плоскость сравнения 0-0** совместим с сечением 1-1, тогда $z_1 = 0$; $z_2 = H_{\text{нас}}$.

5. Запишем уравнение Бернулли (4.15) и произведём преобразования:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{тр}};$$

$$z_1 = 0;$$

$$z_2 = H_{\text{нас}};$$

$$p_1 = p_{\text{ат}};$$

$$p_2 = p_{\text{ат}} - p_{\text{нас}};$$

$$v_1 = 0;$$

$$v_2 = v_{\text{ас}}; \alpha_2 = 1,0 \text{ (турбулентный режим в круглой трубе).}$$

После подстановки параметров и сокращений:

$$\frac{p_{\text{нас}}}{\rho g} = H_{\text{нас}} + \frac{v_{\text{ас}}^2}{2g} + h_{\text{тр}}. \quad (6.15)$$

Прочитаем преобразованное уравнение Бернулли: вакуумметрический напор на входе в насос должен быть таким, чтобы обеспечить подъём воды на высоту $H_{\text{нас}}$, создать скоростной напор $\frac{v_{\text{ас}}^2}{2g}$ и преодолеть гидравлические сопротивления $h_{\text{тр}}$.

Из формулы (6.15) представим высоту установки центробежного насоса:

$$H_{\text{нас}} = \frac{p_{\text{нас}}}{\rho g} - \frac{v_{\text{ас}}^2}{2g} - h_{\text{тр}}. \quad (6.16)$$

Определим потери напора в гидравлических сопротивлениях ($h_{\text{тр}}$), пользуясь формулами (5.1), (5.2) и (5.3):

$$h_{\text{тр}} = \Sigma h_r + h_f;$$

$$\Sigma h_r = \Sigma \zeta_r \frac{v^2}{2g} \quad \text{и} \quad h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

Рассчитаем скорость всасывания и скоростной напор через расход (Q):

$$Q = v_{\text{ас}} \omega = \frac{\pi d^2}{4} v_{\text{ас}}, \text{ отсюда } v_{\text{ас}} = \frac{4Q}{\pi d^2},$$

получим

$$v_{\text{ас}} = \frac{4 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,1^2} = 1,15 \text{ м/с};$$

скоростной напор: $\frac{v_{\text{м}}^2}{2g} = \frac{1,15^2}{2 \cdot 9,8} = 0,067 \text{ м}$ (достаточно малая величина).

Потери напора в местных сопротивлениях $\Sigma h_{\text{л}}$:

$$\Sigma h_{\text{л}} = \Sigma \zeta \frac{v_{\text{м}}^2}{2g},$$

где

$$\Sigma \zeta = \zeta_{\text{вхл}} + \zeta_{\text{вкл}},$$

по табл. 4 и табл. 5 (см. приложение) находим:

$$\zeta_{\text{вхл}} = 10,0; \zeta_{\text{вкл}} = 0,39 \text{ (для } d=100 \text{ мм); значит } \Sigma \zeta = 10,37,$$

тогда

$$\Sigma h_{\text{л}} = 10,37 \cdot 0,067 = 0,7 \text{ м.}$$

Чтобы рассчитать потери напора по длине ($h_{\text{д}}$), необходимо выбрать расчётную формулу коэффициента гидравлического сопротивления (λ). Проанализируем схему выбора расчётной формулы λ (см. рис. 5.1). По условию задачи дано *описание состояния внутренней поверхности трубы: водопроводная труба несколько загрязнённая*, значит, коэффициент λ определяем по формуле (5.16):

$$\lambda = \frac{8g}{C^2},$$

где коэффициент Шези (C) рассчитываем по формуле Маннинга (5.17):

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6},$$

по табл. 7 (см. приложение) для несколько загрязнённых труб принимаем $n=0,013$ или $1/n=76,9$.

Гидравлический радиус (R) для круглой трубы, согласно формуле (4.2): $R = d/4 = 0,025 \text{ м}$.

$$\text{Получим } C = 76,9 \cdot 0,025^{1/6} = 41,53.$$

Рассчитаем значение коэффициента гидравлического сопротивления λ по формуле (5.16):

$$\lambda = \frac{8 \cdot 9,8}{41,53^2} = 0,045.$$

Потери напора по длине по формуле (5.3):

$$h_l = 0,045 \frac{25}{0,1} 0,067 = 0,75 \text{ м.}$$

Все потери напора в гидравлических сопротивлениях по формуле (5.1):

$$h_w = 0,7 + 0,75 = 1,45 \text{ м.}$$

Рассчитаем вакуумметрический напор, входящий в формулы (6.15) и (6.16):

$$H_{\text{вк}} = \frac{P_{\text{вк}}}{\rho g} = \frac{0,6 \cdot 98 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 9,8} = 6 \text{ м.}$$

Подставим все данные в формулу (6.16):

$$H_{\text{вас}} = 6,0 - 0,067 - 1,45 = 4,5 \text{ м.}$$

Анализ проведённого решения показывает, что высота установки центробежного насоса зависит от величины вакуума на входе в насос. Обычно вакуум перед рабочим колесом насоса должен быть в пределах $H_{\text{вк}} \leq 4,0 + 7,0 \text{ м вод.ст.}$

Пример расчёта насосной установки с построением паворной характеристики водоотливного трубопровода хорошо представлен в учебнике "Гидравлика и гидропривод". Авторы: В. Г. Гейер, В. С. Дулин и др. М.: Недра, 1981.

Ответ: высота установки насоса $H_{\text{вас}} = 4,5 \text{ м.}$

Рассмотрим расчёт сифона. Сифоном называется короткий трубопровод, расположенный выше горизонта жидкости в питающем резервуаре, способный перемещать жидкость в другой резервуар, уровень жидкости в котором ниже уровня в питающем резервуаре (см. рис. 6.8), т. е. должна быть *постоянная разность уровней в резервуарах*.

Принцип действия сифона основан на создании вакуума в верхней точке сифона, для этого сифонную трубу каким-либо способом заполняют жидкостью до верхней точки, например, устанавливают подпитывающий трубопровод. На входе в сифонную трубу, как правило, устанавливают сетку с обратным клапаном, который закрывается при заполнении трубы жидкостью, а при работе сифона обратный клапан поднимается (открывается).

Расчёт сифона включает определение двух параметров - пропускной способности (расхода) и высоты сифона.

В задаче 6.2.5 представлен расчёт сифона с истечением жидкости под уровень.

Задача 6.2.5. Рассчитать максимальную пропускную способность и высоту сифона, откачивающего воду из верхнего зумфа в нижний, при неизменной разности уровней воды в зумфах $H = 2,0$ м. Труба водопроводная нормальная диаметром $d = 150$ мм длиной $l_1 = 10$ м (до верхней точки сифона) и $l_2 = 20$ м. На входе в трубу установлена водозаборная сетка с обратным клапаном. Система имеет вентиль с коэффициентом сопротивления $\zeta_{\text{вент}} = 7,0$, одно колено с углом поворота $\alpha = 90^\circ$ и два поворота трубы с углами $\alpha_1 = 30^\circ$ и $\alpha_2 = 60^\circ$. Величина предельного вакуума в верхней точке сифона $p_{\text{вак}} = 0,55$ ат (рис. 6.8).

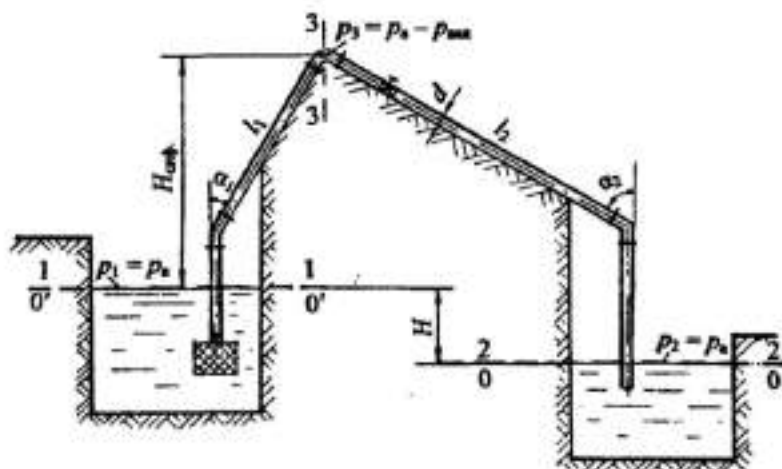


Рис. 6.8

Решение. Как и в предыдущих задачах, при расчёте сифона пользуемся уравнением Бернулли, методика составления которого уже отработана.

1. Определим пропускную способность сифона (Q).

Следует провести расчёт простой трубопроводной системы с истечением под уровень (см. раздел 6.1.2).

Составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2, проведённых по свободным поверхностям воды в зумфах, где скорости можно считать равными нулю ($v_{1\text{сеч}} = v_{2\text{сеч}} = 0$), а абсолютное давление - равным

атмосферному ($p_1 = p_a$; $p_2 = p_a$), так как резервуары открыты. Плоскость сравнения совместим с сечением 2-2, тогда $z_1 = H$; $z_2 = 0$.

Запишем уравнение Бернулли (4.15) и сделаем подстановку параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{сиф}};$$

$$\begin{aligned} z_1 &= H; & z_2 &= 0; \\ p_1 &= p_a; & p_2 &= p_a; \\ v_{1 \text{ сиф}} &= 0; & v_{2 \text{ сиф}} &= 0. \end{aligned}$$

После подстановки данных и сокращений получим:

$$H = h_{\text{сиф}}. \quad (6.17)$$

Прочитаем формулу (6.17): разность уровней жидкости H (напор) в резервуарах должна быть такой, чтобы преодолеть гидравлические сопротивления в трубопроводе — $h_{\text{сиф}}$.

Представим потери напора в гидравлических сопротивлениях с учётом формул (5.1), (5.2) и 5.3):

$$h_{\text{сиф}} = \Sigma h_i + h_f = \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d} \frac{v^2}{2g}$$

или

$$h_{\text{сиф}} = \frac{v^2}{2g} \left(\Sigma \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d} \right).$$

Формулу (6.17) представим в следующем виде:

$$H = \frac{v^2}{2g} \left(\Sigma \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d} \right). \quad (6.18)$$

Формула (6.18) аналогична формуле (6.7). Найдём скорость движения воды в трубе (v):

$$v = \sqrt{\frac{1}{\Sigma \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d}}} \sqrt{2gH},$$

$$\text{расход } Q = \omega v: \quad Q = \omega \sqrt{\frac{1}{\Sigma \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d}}} \sqrt{2gH}. \quad (6.19)$$

Формула (6.19) аналогична формуле (6.8).

$$\text{Обозначим:} \quad \sqrt{\frac{1}{\Sigma \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d}}} = \mu_{\text{сиф}}, \quad (6.20)$$

где $\mu_{\text{сиф}}$ – коэффициент расхода сифона. Рассчитаем этот коэффициент.

Сумма коэффициентов местных сопротивлений:

$$\Sigma \zeta = \zeta_{\text{откл}} + \zeta_{\text{коз1}} + \zeta_{\text{коз2}} + \zeta_{\text{коз3}} + \zeta_{\text{вент}} + \zeta_{\text{выкл}}$$

Пользуясь табл. 4 и табл. 5 (см. приложение), рассчитаем $\Sigma \zeta$:

$$\Sigma \zeta = 10,0 + 0,2 + 0,37 + 0,55 + 7,0 + 1,0 = 19,12.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления (коэффициент Дарси) для нормальных водопроводных труб принимаем $\lambda = 0,0286$ для $d = 150$ мм по табл. 8 (см. приложение).

Получим значение коэффициента расхода сифона:

$$\mu_{\text{сиф}} = \sqrt{\frac{1}{19,12 + 0,0286 \frac{30}{0,15}}} = 0,2.$$

Подставляя все параметры в формулу (6.19), учитывая, что площадь живого сечения трубы $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$, значит:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \mu_{\text{сиф}} \sqrt{2gH}. \quad (6.21)$$

После подстановки численных значений:

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,15^2}{4} \cdot 0,2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2,0} = 0,022 \text{ м}^3/\text{с} = 22 \text{ л/с}.$$

2. **Определим высоту сифона.** За высоту сифона ($H_{\text{сиф.}}$) принимается превышение верхней точки сифона над уровнем жидкости в питающем резервуаре (см. рис. 6.8).

Для расчёта высоты сифона воспользуемся уравнением Бернулли (4.15) для сечений 1-1 по свободной поверхности в питающем резервуаре и 3-3 - в верхней точке сифона. Сечение 3-3 проводим нормально к направлению движения потока воды, где скорость равна v , а абсолютное давление $p_3 = p_a - p_{\text{вак.}}$. Плоскость сечения $0' - 0'$ совместим с сечением 1-1, тогда $z_1 = 0$; $z_3 = H_{\text{сиф.}}$.

Рассуждения по составлению уравнения Бернулли для определения высоты сифона свидетельствуют о том, что расчёт высоты сифона аналогичен расчёту высоты установки центробежного насоса (см. задачу 6.2.4).

Итак, уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 3-3:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} + h_{\text{м-3}};$$

$$z_1 = 0;$$

$$z_3 = H_{\text{сиф.}};$$

$$p_1 = p_a;$$

$$p_3 = p_a - p_{\text{вак.}};$$

$$v_1 = 0;$$

$$v_3 = v; \alpha_3 = 1,0 \text{ (для круглой водопроводной трубы).}$$

Потери напора в гидравлических сопротивлениях учитываются между сечениями 1-1 и 3-3:

$$h_{\text{м-3}} = \Sigma h_{\text{г-3}} + h_{\text{б-3}} = \Sigma \zeta_{1-3} \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{l_1}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

После подстановки данных в уравнение Бернулли получим:

$$H_{\text{сиф.}} = \frac{p_{\text{вак.}}}{\rho g} - \frac{v^2}{2g} \left(1 + \Sigma \zeta_{1-3} + \lambda \frac{l_1}{d} \right). \quad (6.22)$$

Скорость движения воды в трубе рассчитаем, зная величину расхода:

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2}; \quad v = \frac{4 \cdot 0,022}{3,14 \cdot 0,15^2} = 1,25 \text{ м/с.}$$

Сумму коэффициентов местных сопротивлений учтём между сечениями 1-1 и 3-3:

$$\Sigma \zeta_{1-3} = \zeta_{\text{септ.}} + \zeta_{\text{вход}_1} + \zeta_{\text{вых}_2}; \quad \Sigma \zeta_{1-3} = 10,57.$$

$$\text{Вакуумметрический напор } H_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g} = \frac{0,55 \cdot 98 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 9,8} = 5,5 \text{ м.}$$

Вакуумметрический напор можно также записать путём перевода ат. в м вод. ст. (см. табл. 2, приложение): 1 ат = 10 м вод. ст., значит, $p_{\text{вак}} = 0,55 \text{ ат} = 5,5 \text{ м вод. ст.}$, т.е. $H_{\text{вак}} = 5,5 \text{ м}$.

Значение коэффициента Дарси (λ) возьмём из предыдущего расчёта: $\lambda = 0,0286$.

После подстановки численных значений параметров в формулу (6.22) получим *высоту сифона*:

$$H_{\text{сиф.}} = 5,5 - \frac{1,25^2}{2 \cdot 9,8} \left(1 + 10,57 + 0,0286 \frac{10}{0,15} \right) = 4,4 \text{ м.}$$

Из формулы (6.22) следует, что максимальная высота сифона определяется максимальным вакуумметрическим напором в верхней точке сифона. Считается, что допустимый вакуум без образования разрыва турбулентности струи $H_{\text{вак.доп.}} = (6 + 7) \text{ м}$. Значит, предельная высота сифона $H_{\text{сиф. макс}} = (5 + 6) \text{ м}$.

Ответ: пропускная способность сифона $Q = 22 \text{ л/с}$; высота сифона $H_{\text{сиф.}} = 4,4 \text{ м}$.

Итак, в разделах 6.1 и 6.2 рассмотрены теория и примеры расчёта простых трубопроводных систем. Методика расчёта таких систем основана на уравнении Бернулли. Важно уметь применить эту методику для расчёта трубопроводных систем различных типов.

В разделе 6.3 предлагаются задачи для самостоятельной работы, которые позволят студентам проверить знания и умение использовать вышеизложенную теорию и методику расчёта простых систем. К задачам даны ответы, однако они могут несколько отличаться от полученных Вами, в зависимости от того, какими таблицами, из каких учебников и учебных пособий Вы пользуетесь.

6.3. Задачи для самостоятельной работы по теме "Расчёт простых трубопроводных систем"

Задача 6.3.1

При закрытом кране на трубопроводе диаметром $d = 50$ мм и длиной $l = 10$ м показание манометра перед краном $p_{\text{ман}} = 0,18$ ат.

Определить показание манометра при открытом кране, если слив воды происходит в мерную ёмкость. За время $t = 30$ с наполняется объём $W = 70,5$ л. Труба водопроводная с абсолютной шероховатостью $\Delta = 1,0$ мм. Учесть потери напора на входе в трубу с острыми кромками. Принять коэффициент вязкости воды $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (рис. 6.9).

Ответ: при открытом кране показание манометра $p_{\text{ман(откр)}} = 0,116$ ат.

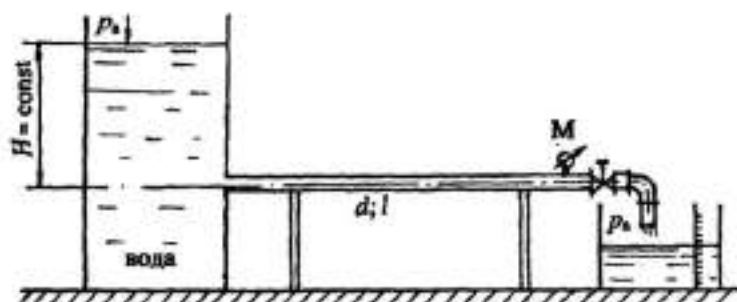


Рис. 6.9

Задача 6.3.2

Из напорного бака с постоянным напором $H = 3,0$ м вода подаётся в зумпф по двум трубам $d_1 = 100$ мм длиной $l_1 = 5,0$ м и $d_2 = 50$ мм длиной $l_2 = 8,0$ м. Определить расход воды в трубопроводе и скорости движения воды в каждой трубе. На трубе диаметром d_1 установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 40^\circ$. Учесть потери напора на входе в трубу с острыми кромками, а также при внезапном сужении ($\zeta_{\text{сж}} = 0,38$). Трубы водопроводные нормальные (рис. 6.10).

Ответ: расход $Q = 5,1$ л/с.

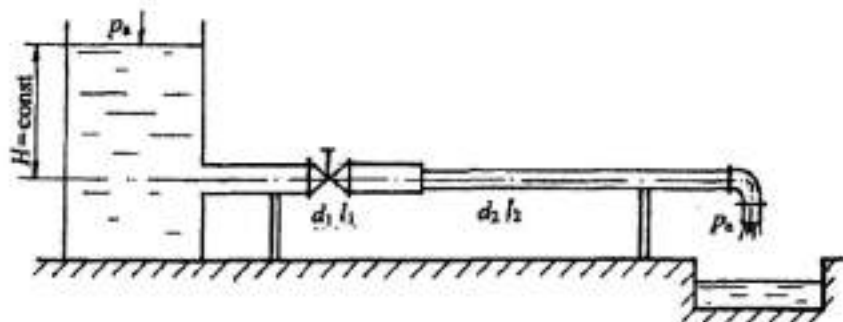


Рис. 6.10

Задача 6.3.3

Из резервуара A в резервуар B вода подаётся по трубопроводу диаметром $d = 50$ мм, состоящему из трёх участков длиной $l_1 = 5,0$ м; $l_2 = 4,0$ м; $l_3 = 6,0$ м. Расход воды в системе $Q = 2,5$ л/с. На входе в трубу установлена решётка без обратного клапана, на первом участке стоит вентиль с коэффициентом сопротивления $\zeta_{\text{вент}} = 5,0$ (рис. 6.11).

Напор воды в резервуаре A $H_1 = 1,5$ м, в резервуаре B - $H_2 = 2,5$ м. Определить показание манометра ($p_{\text{ман}2}$) на поверхности воды в резервуаре B , если показание манометра на поверхности воды в резервуаре A $p_{\text{ман}1} = 0,45$ ат. Принять абсолютную шероховатость трубы $\Delta = 0,5$ мм; кинематический коэффициент вязкости воды $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Построить напорную и пьезометрическую линии.

Ответ: показание второго манометра $p_{\text{ман}2} = 0,15$ ат.

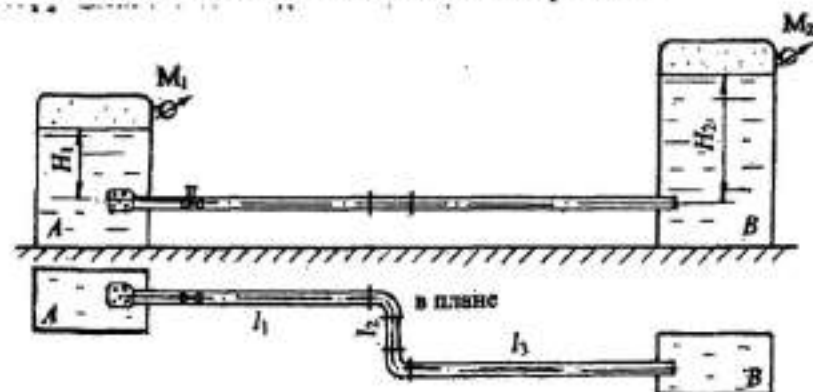


Рис. 6.11

Задача 6.3.4

Определить расход воды из дозаторного резервуара A в резервуар B при постоянном напоре $H = 2,5$ м по трубам $d_1 = 50$ мм; $l_1 = 5,0$ м и $d_2 = 100$ мм; $l_2 = 8,0$ м. Трубы водопроводные нормальные. На трубе $d_2 = 100$ мм установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 40^\circ$.

Учесть потери напора на входе и выходе трубопроводной системы, а также при внезапном расширении трубопровода. Построить напорную и пьезометрическую линии, показать эпюру потерь напора (рис. 6.12).

Ответ: расход воды $Q = 5,5$ л/с.

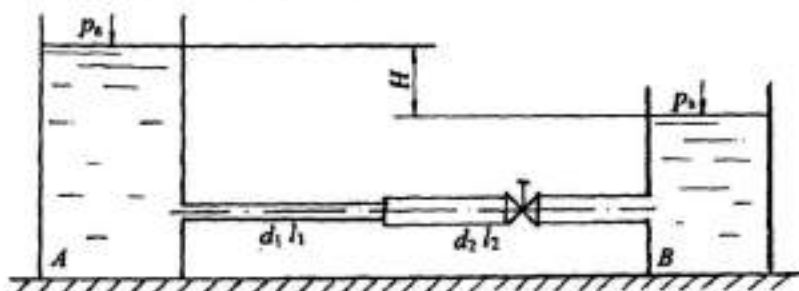


Рис. 6.12

Задача 6.3.5

С помощью насоса вода подается в напорный бак на высоту $H = 6,0$ м, диаметр трубы $d = 100$ мм, длина $l = 80$ м. Показание манометра в начале трубопровода $P_{ман1} = 1,5$ ат, в конце $P_{ман2} = 0,75$ ат. Определить, при каком коэффициенте сопротивления пробкового крана будет обеспечен расход $Q = 6,0$ л/с. Принять абсолютную шероховатость трубы $\Delta = 0,5$ мм, коэффициент кинематической вязкости воды $\nu = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с (рис. 6.13).

Ответ: коэффициент сопротивления пробкового крана $\zeta_{кр} = 25,6$.

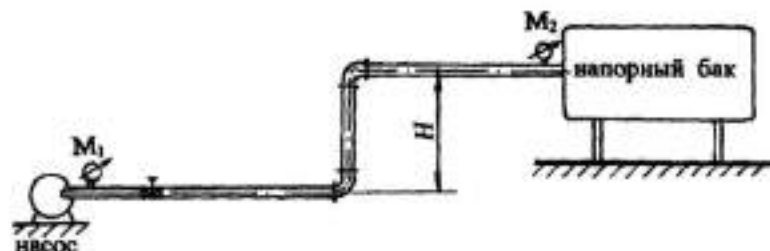


Рис. 6.13

Задача 6.3.6

Бензин из бензохранилища с помощью насоса подается в бензобак на высоту $H = 3,0$ м. На поверхности бензина в бензобаке поддерживается вакуум $p_{\text{вак}} = 0,16$ ат. Определить, каким должно быть манометрическое давление ($p_{\text{ман}}$ в ат) на выходе из насоса при подаче $Q = 2,4$ л/с, если транспортирование бензина происходит по новой стальной трубе с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,05$ мм, диаметром $d = 50$ мм, длиной $l = 30$ м, на трубе установлена задвижка Лудло со степенью закрытия $a/d = 5/8$, учесть потери напора в двух коленах и на выходе из трубы в бензобак. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бен}} = 720$ кг/м³; коэффициент кинематической вязкости бензина $\nu_{\text{бен}} = 0,65 \cdot 10^{-4}$ м²/с (рис. 6.14).

Ответ: манометрическое давление $p_{\text{ман}} = 0,3$ ат.

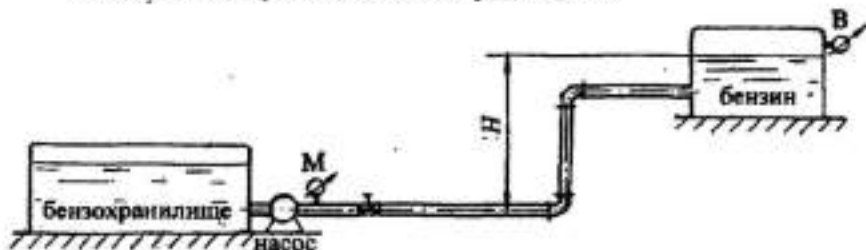


Рис. 6.14

Задача 6.3.7

В пневмотранспортной системе регулирование скорости и расхода воздуха осуществляется с помощью задвижки и контролируется по U-образному спиртовому мановакуумметру, установленному на входном участке коллектора. Определить, каким должно быть показание мановакуумметра ($h_{\text{сп}}$) на трубе диаметром $d = 100$ мм при расходе воздуха $Q = 180$ л/с. Принять коэффициент сопротивления на входе в коллектор $\zeta_{\text{вх}} = 0,2$; плотность воздуха $\rho_{\text{возд}} = 1,22$ кг/м³; плотность спирта $\rho_{\text{сп}} = 880$ кг/м³ (рис. 6.15).

Ответ: показание U-образного мановакуумметра $h_{\text{сп}} = 45$ мм.

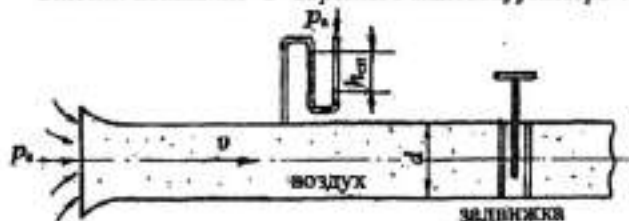


Рис. 6.15

Задача 6.3.8

В плотине сделан водоспуск в виде железобетонной трубы с весьма хорошей бетонировкой диаметром $d = 800$ мм и длиной $l = 5,0$ м. Напор над водоспуском при истечении в атмосферу $H = 4,0$ м. Определить пропускную способность трубы (Q , м³/с), если она имеет водозаборную сетку без обратного клапана.

Как изменится пропускная способность трубы, если за водосливом напор поднимется до $h = 2,5$ м (рис. 6.16).

Ответ: в первом случае $Q_1 = 1,44$ м³/с; во втором — $Q_2 = 1,02$ м³/с.

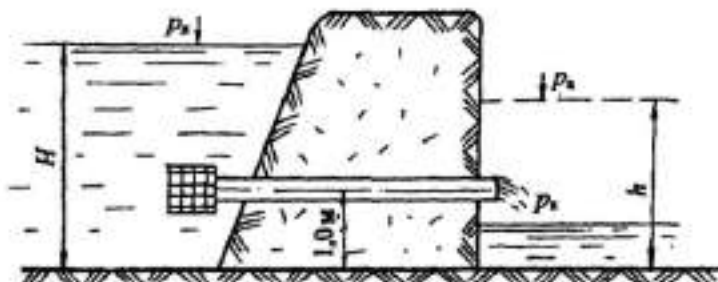


Рис. 6.16

Задача 6.3.9

Определить показание U-образного спиртового манометра, установленного на трубе Вентури в вентиляционном трубопроводе при значениях диаметров $d_1 = 100$ мм и $d_2 = 50$ мм, если расход воздуха $Q = 78,5$ л/с. Принять плотность воздуха $\rho_{\text{возд.}} = 1,23$ кг/м³; плотность спирта $\rho_{\text{сп.}} = 820$ кг/м³. Коэффициент сопротивления трубы Вентури принять равным $\zeta_{\text{вент.}} = 0,2$ (рис. 6.17).

Ответ: показание U-образного манометра $h_{\text{сп.}} = 140$ мм.

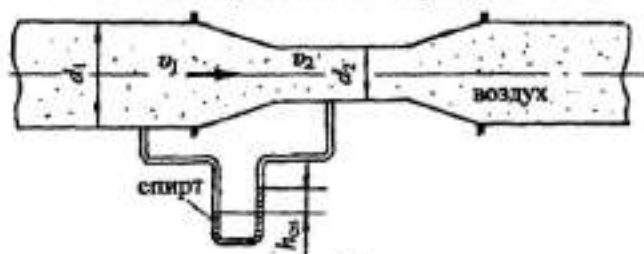


Рис. 6.17

Задача 6.3.10

Для измерения расхода воды в трубопроводе диаметром $d_1 = 100$ мм установлен расходомер Вентури с диаметром цилиндрической части $d_2 = 50$ мм. К широкой и узкой части расходомера подсоединены пьезометры в виде U-образной трубки, расстояние между которыми равно z .

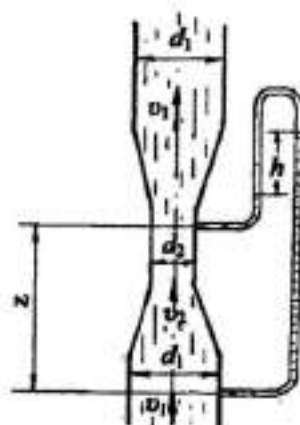


Рис. 6.18

Пренебрегая потерями напора в расходомере, определить скорости в широкой и узкой части трубы Вентури, а также расход воды в трубопроводе, если разность показаний пьезометров $h = 40$ см. При расчёте давлением столба воздуха в пьезометре пренебречь. Коэффициент Корзиолиса принять равным единице ($\alpha = 1,0$) (рис. 6.18).

Ответ: скорость $v_1 = 0,72$ м/с;
 $v_2 = 2,9$ м/с; расход воды в трубопроводе
 $Q = 5,7$ л/с.

Задача 6.3.11

Для определения коэффициента кинематической вязкости (ν) масла "Турбинное 30" производится прокачка его через трубку диаметром $d = 12,5$ мм. На расстоянии $l = 1,5$ м подключён U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{рт.} = 50$ мм. Расход масла $Q = 0,1$ л/с, плотность масла $\rho_{масл.} = 900$ кг/м³, плотность ртути $\rho_{рт.} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Предположить режим движения масла ламинарным. По окончании расчёта проверить режим движения (рис. 6.19).

Ответ: коэффициент кинематической вязкости масла $\nu = 0,3 \cdot 10^{-4}$ м²/с.

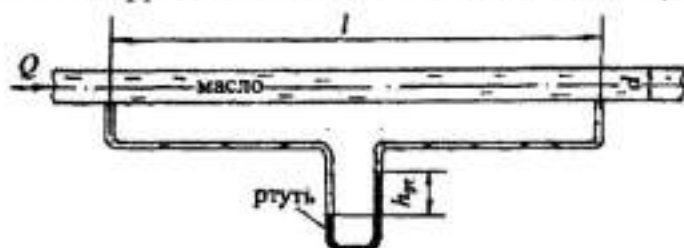


Рис. 6.19

Задача 6.3.12

Определить, на какой высоте (h) следует установить шестерёчатый насос системы смазки, подающий масло "Турбинное 22" при расходе $Q = 0,6$ л/с по стальной трубе диаметром $d = 35$ мм и длиной $l = 2,0$ м. Показание вакуумметра на входе в насос $p_{\text{вк}} = 0,15$ ат.

В системе установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 40^\circ$. Учесть потери напора в двух коленах при $\zeta_{\text{кол}} = 0,86$ и на входе в трубу из бензобака $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$. Принять плотность масла $\rho_{\text{масл}} = 900$ кг/м³, коэффициент кинематической вязкости масла $\nu_{\text{масл}} = 22 \cdot 10^{-6}$ м²/с (рис. 6.20).

Ответ: высота установки насоса $h = 1,18$ м.

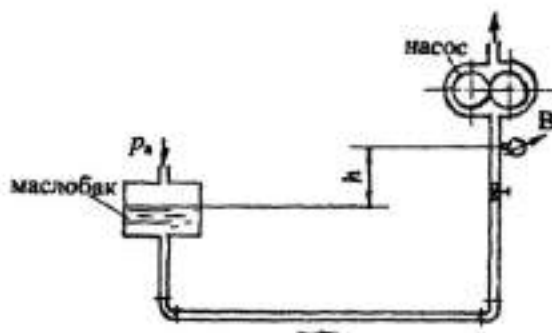


Рис. 6.20

Задача 6.3.13

Сифонный водосброс диаметром $d = 200$ мм и длиной $l = 10$ м сбрасывает воду из водохранилища в водоём, уровень которого на $H = 2,5$ м ниже уровня воды в водохранилище.

Определить пропускную способность сифона (Q , л/с), если труба водопроводная загрязнённая имеет водозаборную сетку с обратным клапаном, два колена: одно с углом закругления $\alpha_1 = 90^\circ$ и отношением $r/R = 0,5$; второе без закругления с углом $\alpha_2 = 60^\circ$; вентиль с коэффициентом сопротивления $\zeta_{\text{вент}} = 5,0$ и выход из трубы в резервуар больших размеров. Рассчитать, каким должен быть вакуум ($p_{\text{вк}}$, в ат.) в конце горизонтального участка сифона, если длина трубы до этого сечения $l_1 = 4,0$ м, высота сифона $h_{\text{сиф}} = 1,5$ м (рис. 6.21).

Ответ: пропускная способность сифона $Q = 51,8$ л/с, вакуум в конце горизонтального участка $p_{\text{вк}} = 0,37$ ат.

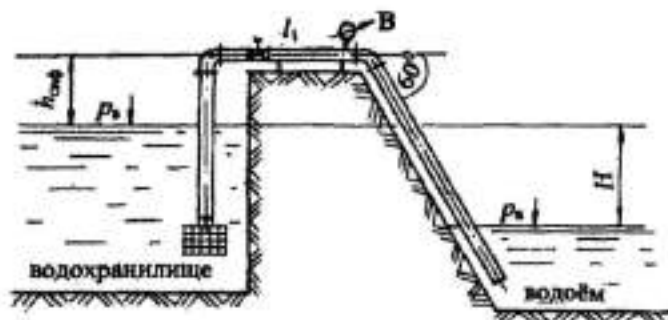


Рис. 6.21

Задача 6.3.14

Определить предельную длину трубопровода диаметром $d = 100$ мм с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,1$ мм, с помощью которого бензин плотностью $\rho_{\text{бен.}} = 720$ кг/м³ и коэффициентом кинематической вязкости $\nu_{\text{бен.}} = 0,65 \cdot 10^{-6}$ м²/с может быть поднят на высоту $H = 15,5$ м при пропускной способности $Q = 8,0$ л/с, если показание манометра после насоса $p_{\text{ман}} = 1,2$ ат. Истечение бензина происходит под уровень. Учесть потери напора в пробковом кране при угле закрытия $\alpha = 30^\circ$, трёх коленах и на выходе из трубы в резервуар больших размеров (рис. 6.22).

Ответ: предельная длина трубопровода $l = 70$ м.

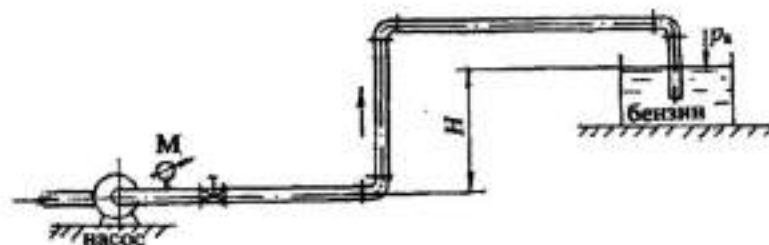


Рис. 6.22

Задача 6.3.15

Из водоёма с помощью центробежного насоса вода подаётся на горное предприятие. Определить высоту расположения оси центробежного насоса над уровнем воды в водоёме ($h_{\text{нас}}$), если расход воды $Q = 30$ л/с, диаметр трубы $d = 200$ мм, длина $l = 25$ м, вакуумметрическое давление на входе в насос $p_{\text{вак}} = 0,5$ ат. На входе в трубу установлена сетка с обратным клапаном. Учесть потери напора в трёх коленах при угле $\alpha = 90^\circ$ и в задвижке Лудло со степенью закрытия $a/d = 5/8$. Считать трубу водопроводной загрязнённой (рис. 6.23).

Ответ: высота установки насоса $h_{\text{нас}} = 3,9$ м.

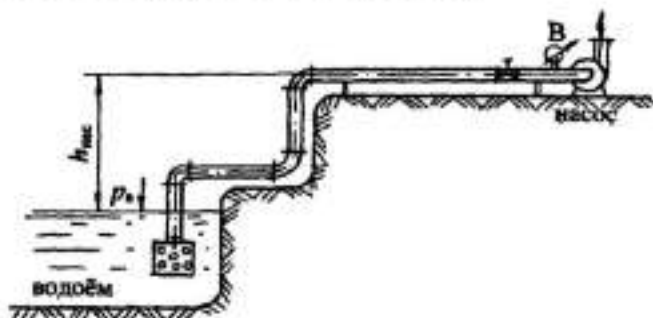


Рис. 6.23

Задача 6.3.16

Поршень диаметром $D = 200$ мм движется равномерно вверх в цилиндре, засасывая воду из открытого водоёма с постоянным уровнем по трубопроводу диаметром $d = 50$ мм и длиной $l = 12$ м. Труба водопроводная нормальная имеет два колена, вход в трубу с острыми кромками и выход воды под уровень. Когда поршень находится выше уровня воды в водоёме на высоте $h = 2$ м, необходимая сила для его перемещения $F = 2,4$ кН.

Определить скорость подъёма поршня (v_n) и найти, до какой высоты $h_{\text{так}}$ его можно поднимать с такой скоростью без опасности отрыва от него жидкости, если давление насыщенных паров $p_{\text{н.п.}} = 4,25$ кПа. Давление насыщенных паров учитывать как абсолютное давление под поршнем. Массой поршня, трением его о стенки и потерями напора в цилиндре можно пренебречь (рис. 6.24).

Ответ: скорость движения поршня $v_n = 0,19$ м/с; максимальная высота подъёма поршня $h_{\text{так}} = 3,72$ м.

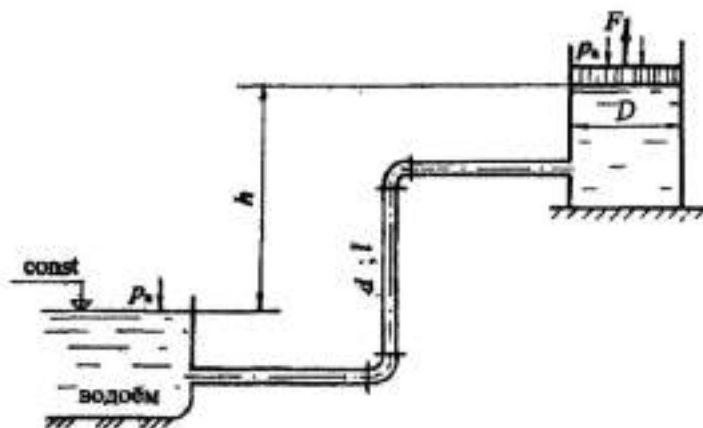


Рис. 6.24

Задача 6.3.17

На водопроводной трубе диаметром $d_1 = 50$ мм установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha_{кр} = 20^\circ$, разность показаний пьезометров, соответствующая потерям напора в кране, $h_{кр} = 45$ см.

Определить разность показаний пьезометров (h) при внезапном расширении трубы до диаметра $d_2 = 100$ мм. Потерями напора по длине между краном и внезапным расширением можно пренебречь (рис. 6.25).

Ответ: разность показаний пьезометров $h = 11$ см.

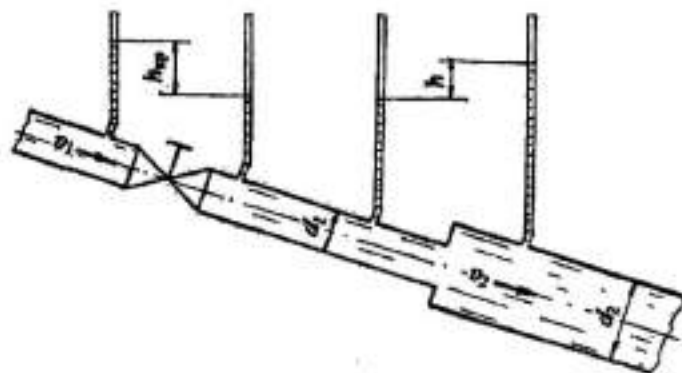


Рис. 6.25

6.4. Расчёт сложных трубопроводных систем

Сложные трубопроводы имеют разветвлённые участки, состоящие из нескольких труб, по которым распределяется жидкость в соответствии с расходами потребителей.

В зависимости от *гидравлической схемы соединения трубопроводов* различают:

1. Системы с *последовательным соединением труб* с одним конечным потребителем или с потребителями по ходу движения жидкости и также с одним конечным потребителем.

2. Системы с *параллельным соединением труб*, или *кольцевые*, также с одним или несколькими потребителями.

3. *Распределительные сети*, или *тупиковые системы*. Это системы с несколькими конечными потребителями.

4. Системы *комбинированного типа*, включающие участки трубопроводных систем первых трёх видов.

5. Системы с *непрерывной раздачей* жидкости, их также называют системами с *путевым расходом*.

Как и при расчёте простых трубопроводных систем (см. раздел 6.1), для сложных систем можно выделить три основных типа расчётов:

- определение *действующего напора* (H); *давления* (p) в системе; *разности напоров* в питающем резервуаре и у потребителя при известном расходе (Q), длинах и диаметрах трубопроводов отдельных участков;

- определение *расходов* жидкости на отдельных участках и в целом в системе при известных геометрических размерах трубопроводов и напоре (или давлении);

- определение *геометрических размеров* труб по заданным для них расходе и перепадах напора (давления).

Встречаются также расчёты, включающие указанные три типа в определённой комбинации для решения инженерных задач.

При расчёте сложных трубопроводных систем по аналогии с простыми системами следует пользоваться уравнением Бернулли. Так, при истечении жидкости у потребителя в атмосферу (см. рис. 6.26) получаем формулу (6.1)

$$H = \frac{v^2}{2g} + h_{\Sigma}.$$

Как правило, в сложных системах скоростным напором ($v^2/2g$) как малой величиной можно пренебречь. Действительно, эксплуатационная скорость в водопроводных системах $v_{\text{эк}} = (1 \div 1,5)$ м/с, реже до 2,0 м/с, значит, скоростной напор $v^2/2g \leq 0,12$ м (очень малая величина по сравнению с действующим напором).

Таким образом, *полный напор* в любом расчётном сечении сложной системы практически *равен гидростатическому напору*, который выражается путём построения *пьезометрической линии*.

В сложных трубопроводных системах потери напора в местных сопротивлениях составляют (5 + 10) % от потерь напора по длине:

$$\Sigma h_r = (0,05 + 0,1) h_l.$$

Тогда, согласно формуле (5.1):

$$h_w = \Sigma h_r + h_l = (1,05 + 1,1) h_l.$$

Формула (6.1) для действующего напора принимает вид:

$$H = (1,05 + 1,1) h_{l_{\text{сист}}}, \quad (6.23)$$

где (1,05 + 1,1) – поправочный коэффициент на местные сопротивления;

$h_{l_{\text{сист}}}$ – потери напора по длине в сложной системе, они представляются в соответствии с гидравлической схемой системы.

Потери напора по длине (h_l) на любом участке для сложных систем рассчитываются через расход (Q) (см. раздел 5.3.3) по формулам (5.19) или (5.21):

$$h_l = \frac{Q^2}{K^2} l \quad \text{или} \quad h_l = A Q^2 l,$$

где K , K^2 , A – обобщённые параметры, которые принимаются по табл. 9 (см. приложение) в зависимости от диаметра трубопровода.

При решении задач по расчёту сложных трубопроводных систем рекомендуется пользоваться следующей *методикой*:

1. Рассматривается распределение расхода в системе. На каждом участке обозначается расход (Q_i) с индексом, соответствующим индексу диаметра трубопровода.

2. Представляются потери напора в системе, согласно схеме соединения труб.

3. По условию поставленной задачи определяются действующий напор, давление, разность напоров в питателе и у потребителя и подобные условия.

4. Дополнительно могут рассчитываться диаметр трубы при заданном расходе, свободный (остаточный) напор у потребителя, геодезическая отметка водонапорной башни или потребителя и тому подобное.

Рассмотрим особенности расчёта сложных трубопроводных систем с различными гидравлическими схемами.

Ниже приведены гидравлические схемы сложных систем от более простых к усложнённым и даны примеры решения задач по расчёту систем.

6.4.1. Системы с последовательным соединением труб

Вначале рассмотрим простой случай сложной системы, состоящей из напорной башни с напором H и трёх последовательно соединённых труб разного диаметра и разной длины с истечением жидкости в атмосферу (число участков может быть любым) (рис. 6.26).

Как отмечалось выше в разделе 6.4, расчёт такой системы можно провести, пользуясь уравнением Бернулли для двух сечений: по свободной поверхности жидкости в напорной башне и на выходе жидкости в атмосферу (см. раздел 6.1.1). Путём рассуждений, приведённых в разделе 6.4, получим формулу (6.23) для действующего напора.



Рис. 6.26

Особенности расчёта системы

Пусть трубопроводная система не имеет путевых потребителей. Пользуемся принятой методикой расчёта сложных систем (см. раздел 6.4).

1. **Распределение расхода.** Ввиду отсутствия потребителей по ходу движения жидкости, расход остаётся величиной постоянной, т. е. какое количество воды поступает из напорной ёмкости, такое же количество истекает в атмосферу у потребителя, следовательно, $Q = \text{const}$.

2. **Потери напора по длине** при последовательном соединении труб рассчитываются, как сумма потерь напора на отдельных участках:

$$h_{\text{длин.}} = h_{l_1} + h_{l_2} + h_{l_3}.$$

3. **Действующий напор** определяется по формуле (6.23)

$$H = (1,05 + 1,1)h_{\text{длин.}} = (1,05 + 1,1)(h_{l_1} + h_{l_2} + h_{l_3}) \quad (6.24)$$

или с учётом формулы (5.21): $h_l = A Q^2 l$ при постоянном расходе:

$$H = (1,05 + 1,1) Q^2 (A_1 l_1 + A_2 l_2 + A_3 l_3), \quad (6.25)$$

где A_1, A_2, A_3 - удельное сопротивление трубопровода, принимается по табл. 9 (см. приложение) в соответствии с диаметрами d_1, d_2, d_3 ;

l_1, l_2, l_3 - длины участков трубопроводов.

4. **Строится пьезометрическая линия** на основном чертеже (рис. 6.26) аналогично построению пьезометрической и напорной линии для простой системы (см. рис. 6.5). При построении пьезометрической линии нужно учитывать не только потери напора по длине, но и потери в местных сопротивлениях, поэтому на каждом участке покажем $h_{\text{м}} = (1,05 + 1,1) A_i Q^2 l_i$.

Проектируем начало трубопровода на свободную поверхность в башне, из конца каждого участка трубопровода проводим вертикальные линии. Откладываем потери напора на первом участке ($h_{\text{м1}}$), изменение потерь напора подчиняется линейному закону, так как длина трубы входит в формулу потерь напора (5.21) в первой степени. К потерям напора на первом участке прибавляем потери напора на втором ($h_{\text{м2}}$) и потери на третьем ($h_{\text{м3}}$) участках. В сумме потери напора равны действующему напору, т. е. весь действующий напор (H) идет только на преодоление сопротивлений в системе, затратой напора на создание скорости при истечении в атмосферу пренебрегаем (см. раздел 6.4).

Вертикальными штриховыми линиями показываем эпюру потерь напора.

5. Пусть **дополнительно** требуется определить показание манометра ($p_{\text{мех}}$), установленного на расстоянии l_N от начала второй трубы.

Покажем *геометрическое* определение потерь напора до точки N . Из точки N проводим вертикальную линию. На *эпюре потерь напора* находим потери напора до точки N (h_{wN}). В месте установки манометра можно показать пьезометр (пунктирная линия). Показание пьезометра соответствует $\frac{P_{ман}}{\rho g}$. Такая методика перевода манометрического давления

в пьезометрический напор была рассмотрена в задачах 2.3.6; 2.3.8; 6.2.2.

Рассмотрим *аналитический расчёт* манометрического давления в точке N :

$$\frac{P_{ман}}{\rho g} = H - (1,05 + 1,1)(h_{\ell} + h_{wN}), \quad (6.26)$$

далее
$$\frac{P_{ман}}{\rho g} = H - (1,05 + 1,1)Q^2(A_1 I_1 + A_2 I_N), \quad (6.27)$$

из формулы (6.27) определяется показание манометра в точке N .

6.4.2. Системы с параллельным соединением труб

Это системы, в которых магистральный трубопровод в некоторой точке разветвляется на несколько труб разных длин и разных диаметров, затем трубы вновь объединяются в магистральный трубопровод того же или другого диаметра. Эти системы называются также *кольцевыми*, т. е. закольцовано несколько труб. Преимущество таких систем состоит в том, что обеспечивается надёжность и бесперебойность работы системы (например, одна из ветвей может быть резервной), а также включение труб меньшего диаметра при той же пропускной способности системы.

Рассмотрим кольцевую систему, представленную в плане. Известно манометрическое давление в начале магистрального участка, длины и диаметры всех участков (рис. 6.27).

Параллельно проложенные трубы разветвляются в точке A и соединяются в точке B , лежат на одном горизонте. Для наглядности параллельное соединение труб показано в изометрии. Пусть отсутствуют путевые потребители, а у конечного потребителя C должен быть остаточный (или свободный) напор $h_{остC}$.

Следуя принятой методике расчёта сложных систем (см. раздел 6.4), рассмотрим *особенности расчёта систем с параллельным соединением труб*.

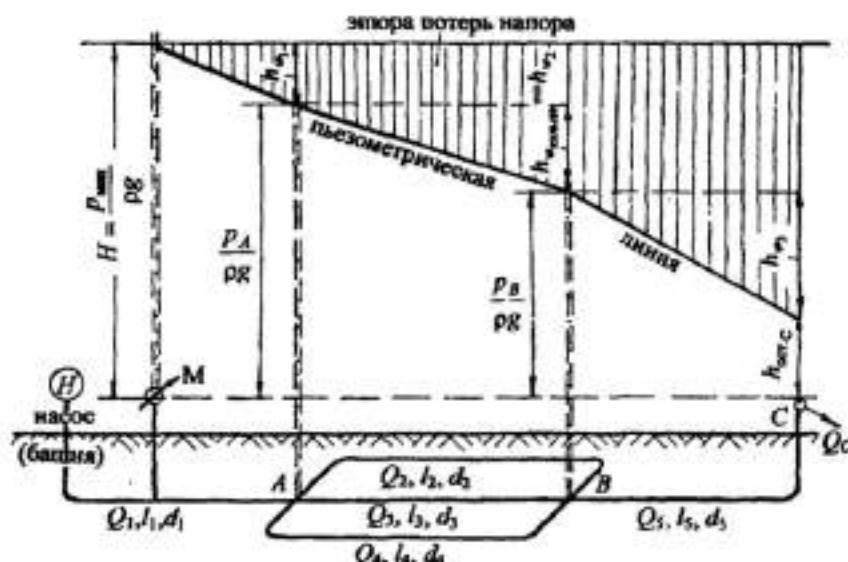


Рис. 6.27

1. **Распределение расхода.** На каждом участке введём обозначение расхода с индексом, соответствующим диаметру: Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 . При отсутствии потребителей по длине системы и наличии только одного конечного потребителя с расходом Q_c расход на магистральном участке равен сумме расходов в параллельных ветвях трубопроводов:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4. \quad (6.28)$$

На пятом магистральном участке $Q_5 = Q_1$, а также $Q_5 = Q_c$.

2. **Потери напора в системе.** При параллельном соединении труб давление, а следовательно, и **пьезометрический напор** в точках разветвления *A* и *B* одинаковы для любого из параллельных участков.

На рис. 6.27 пунктирными линиями показаны пьезометры в точках *A* и *B*, а также пьезометрические напоры $\frac{P_A}{\rho g}$ и $\frac{P_B}{\rho g}$.

В главе 5 отмечалось, что потери напора в гидравлических сопротивлениях определяются, как разность показаний пьезометров в начале и в конце участков сопротивлений, следовательно, **потери напора в кольце равны потерям напора по любому из параллельных участков**:

$$\frac{P_A}{\rho g} - \frac{P_B}{\rho g} = h_{\text{потери}},$$

$$h_{\text{потери}} = h_{w_2} = h_{w_3} = h_{w_4}. \quad (6.29)$$

Из равенства потерь напора в параллельных участках трубопроводов можно найти распределение расходов по ветвям в кольце. Приравняем потери по длине, т. е. в формуле (6.29) не учитываем поправочный коэффициент на местные сопротивления:

$$h_{l_2} = h_{l_3} = h_{l_4}, \quad (6.30)$$

$$\text{или с учётом формулы (5.21): } A_2 Q_2^2 l_2 = A_3 Q_3^2 l_3 = A_4 Q_4^2 l_4. \quad (6.31)$$

Имеем *два уравнения* (6.28) и (6.31) *с тремя неизвестными*. Решим их.

В формуле (6.31) выразим Q_3 через Q_2 , затем Q_4 через Q_2 , подставим значения Q_3 и Q_4 в формулу (6.28), получим уравнение с одним неизвестным Q_2 (при условии, что Q_1 задано). Определим Q_2 , затем Q_3 и Q_4 .

$$\text{Итак, приравняем: } A_2 Q_2^2 l_2 = A_3 Q_3^2 l_3,$$

$$\text{выразим } Q_3 \text{ через } Q_2: \quad Q_3 = Q_2 \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_3 l_3}}; \quad (6.32)$$

$$\text{приравняем: } A_2 Q_2^2 l_2 = A_4 Q_4^2 l_4,$$

$$\text{выразим } Q_4 \text{ через } Q_2: \quad Q_4 = Q_2 \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_4 l_4}}. \quad (6.33)$$

Подставим значения Q_3 и Q_4 в формулу (6.28):

$$Q_1 = Q_2 \left(1 + \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_3 l_3}} + \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_4 l_4}} \right), \quad (6.34)$$

получим Q_2 , выраженное через Q_1 :

$$Q_2 = \frac{Q_1}{\left(1 + \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_3 l_3}} + \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_4 l_4}} \right)}, \quad (6.35)$$

затем по формулам (6.32) и (6.33) определим Q_3 и Q_4 .

При расчётах формула (6.35) математически становится очень простой, так как $\sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_3 l_3}}$ и $\sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_4 l_4}}$ представляют собой простые числа: длины участков заданы, значения коэффициентов A в соответствии с диаметром трубы принимаются по табл. 9 (см. приложение).

Таким образом, рассмотрены два самых важных момента при расчёте кольцевых систем: *расход на магистральном участке равен сумме расходов в параллельных ветках; потери напора в параллельных участках равны.*

3. Действующий напор для представленной кольцевой системы (см. рис. 6.27) с учётом формулы (6.23):

$$H = (1,05 + 1,1)h_{\text{вст.}} + h_{\text{ост.с}} = (1,05 + 1,1)(h_h + h_{l_{\text{всп.}}} + h_{l_2}) + h_{\text{ост.с}}. \quad (6.36)$$

Прочитаем формулу (6.36): действующий напор должен быть таким, чтобы преодолеть сопротивление в системе и обеспечить остаточный напор у потребителя C .

Учтём потери напора в кольце, например, по второму участку кольца, введём в формулу (6.36) расходы:

$$H = (1,05 + 1,1)(A_1 Q_1^2 l_1 + A_2 Q_2^2 l_2 + A_3 Q_3^2 l_3) + h_{\text{ост.с}}. \quad (6.37)$$

Следует помнить, что $H = \frac{P_{\text{вст.}}}{\rho g}$.

4. На схеме установки (см. рис. 6.27) строим пьезометрическую линию и эпюру потерь напора по аналогии с системой последовательно соединённых труб (см. рис. 6.26).

6.4.3. Распределительные сети, или тупиковые системы

Это сложные системы, состоящие из разветвлённой сети трубопроводов, имеющие несколько конечных потребителей. Как правило, известно, какими расходами следует обеспечить потребителей, а также какой должен быть остаточный (свободный) напор у потребителя или на какую отметку следует поднять воду у потребителя. При известном расходе ставится также задача подобрать диаметры трубопроводов.

Тупиковые системы принято представлять в плане. Рассмотрим принцип расчёта тупиковой водопроводной системы на примере системы, представленной на рис. 6.28. Система имеет четыре конечных потребителя (A, B, C, D) и один потребитель в точке N по пути движения воды. Остаточные напоры (или высота подъёма) воды у конечных потребителей различные ($h_{ост. A}, h_{ост. B}, h_{ост. C}, h_{ост. D}$).

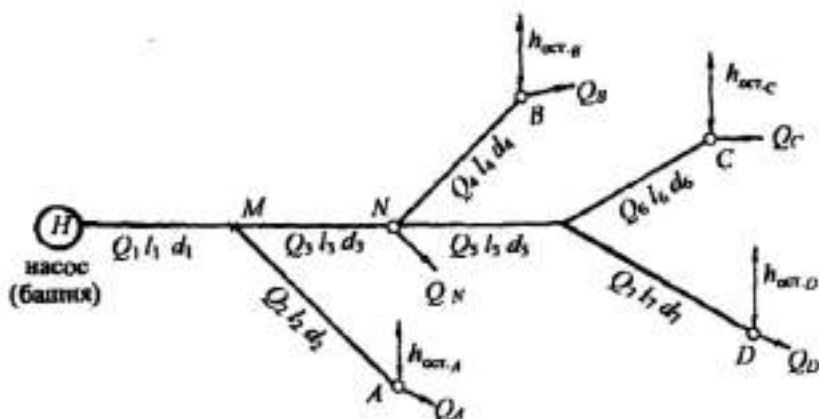


Рис. 6.28

Согласно принятой *методике* расчёта сложных систем (см. раздел 6.4), покажем *особенности расчёта тупиковых систем*.

1. *Распределение расхода*. Расход на каждом участке представим через расходы потребителей. Помним, что на магистральном участке расход равен сумме расходов потребителей. Первый участок является магистральным для всех потребителей:

$$Q_1 = Q_A + Q_N + Q_B + Q_C + Q_D, \text{ а также } Q_1 = Q_2 + Q_3.$$

На третьем участке:

$$Q_3 = Q_N + Q_A + Q_C + Q_D; \text{ а также } Q_3 = Q_N + Q_4 + Q_5.$$

На пятом участке:

$$Q_5 = Q_C + Q_D; \text{ а также } Q_5 = Q_6 + Q_7.$$

На отдельных участках, ведущих к потребителю, расход равен расходу потребителя:

$$Q_2 = Q_A; \quad Q_4 = Q_B; \quad Q_5 = Q_C; \quad Q_7 = Q_D.$$

2. Потери напора по длине любого из направлений рассчитываются из условия последовательного соединения труб, т. е. суммируются. Для рассматриваемой схемы (см. рис. 6.28) потери напора до потребителя А:

$$h_{fA} = h_{h-2} = h_{h_1} + h_{h_2},$$

до потребителя В:
$$h_B = h_{h-3-4} = h_{h_1} + h_{h_3} + h_{h_4},$$

до потребителей С и D соответственно:

$$h_{fC} = h_{h-3-5-6} = h_{h_1} + h_{h_3} + h_{h_5} + h_{h_6};$$

$$h_{fD} = h_{h-3-5-7} = h_{h_1} + h_{h_3} + h_{h_5} + h_{h_7}.$$

Потери напора с учётом местных сопротивлений по любому направлению

$$h_{\text{вентр}} = (1,05 + 1,1) h_{\text{длин}}. \quad (6.38)$$

Поправочный коэффициент на местные сопротивления (1,05+1,1) принимается согласно поставленному условию в задаче.

3. Потребный действующий напор (H), или высота водонапорной башни, определяется по максимальной величине суммы потерь напора и остаточного напора по одному из направлений. В частности, для представленной схемы (см. рис. 6.28) действующий напор:

$$H = (h_{\text{вентр}} + h_{\text{ост}})_{\text{max}}, \quad (6.39)$$

$$\text{где } \left. \begin{array}{l} h_{\text{вентр}} + h_{\text{ост.А}} \\ h_{\text{вентр}} + h_{\text{ост.В}} \\ h_{\text{вентр}} + h_{\text{ост.С}} \\ h_{\text{вентр}} + h_{\text{ост.Д}} \end{array} \right\} \text{сравниваем, из них выбираем максимальную величину:}$$

$$\text{т. е. } (h_{\text{вентр}} + h_{\text{ост}})_{\text{max}}.$$

4. Дополнительным условием в задаче может быть расчёт *диаметра трубопровода* по заданному расходу потребителя, при этом рекомендуется эксплуатационная скорость в пределах $v_{\text{эк}} = (1,0 \div 1,5) \text{ м/с}$.

Диаметр трубопровода на любом участке рассчитывается через расход:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_{\text{эк}}}}. \quad (6.40)$$

По окончании расчёта, как правило, строится пьезометрическая линия.

6.4.4. Системы с путевым расходом жидкости

Эти системы включают трубопровод, в котором жидкость раздается в ряде пунктов по его длине. При большом количестве таких пунктов с достаточной точностью можно считать, что расход жидкости распределяется равномерно по длине l с интенсивностью $q = Q_{\text{пут}}/l$. Такие трубопроводы называются также трубопроводами с равномерной раздачей жидкости.

Наиболее характерным является случай, когда в трубопроводе кроме равномерного путевого расхода $Q_{\text{пут}} = ql$ имеется транзитный расход $Q_{\text{тр}}$, проходящий по трубе и забираемый в конце трубопровода (рис. 6.29). При этом общий расход жидкости, поступающий в трубопровод:

$$Q = Q_{\text{тр}} + Q_{\text{пут}} = Q_{\text{тр}} + ql.$$

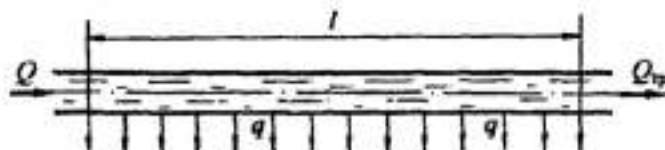


Рис. 6.29

Основным вопросом для систем с путевым расходом является определение величины потеряннного напора. Общие потери по длине трубопровода с учётом путевого и транзитного расходов можно определить по формуле

$$h_l = A l \left(Q_{\text{тр}}^2 + Q_{\text{тр}} Q_{\text{пут}} + \frac{Q_{\text{пут}}^2}{3} \right), \quad (6.41)$$

где λ – удельное сопротивление для заданного диаметра трубы, принимается по табл. 9 (см. приложение).

Основные теоретические положения по расчёту сложных систем рассмотрены. Ниже предлагаются примеры решения задач с построением пьезометрических (напорных) линий.

6.5. Примеры решения задач по теме: "Расчёт сложных трубопроводных систем"

Задачи 6.5.1. Сложная система с водонапорной башней включает кольцевое соединение труб и доставляет воду двум потребителям (рис. 6.30).

Определить отметку уровня воды в водонапорной башне, питающей два потребителя: A с расходом $Q_A = 18$ л/с и C с расходом $Q_C = 32$ л/с. Система включает магистральный трубопровод $d_1 = 250$ мм; $l_1 = 600$ м; два параллельно проложенных трубопровода: $d_2 = 150$ мм; $l_2 = 550$ м; $d_3 = 100$ мм; $l_3 = 400$ м и трубопровод $d_4 = 200$ мм; $l_4 = 720$ м, подающий воду потребителю C . Остаточный напор у потребителя C должен быть не менее 10 м ($h_{\text{ост}C} \geq 10$ м).

Трубы водопроводные нормальные. Местные потери напора принять равными 10 % от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию.

Решение. Руководствуемся *методикой* расчёта сложных систем с параллельным соединением труб (см. раздел 6.4.2).

1. *Распределение расхода* (пропускной способности). На каждом участке вводим обозначение расхода с индексом, соответствующим индексу диаметра трубы (см. рис. 6.30).

Расход на первом участке равен сумме расходов потребителей:

$$Q_1 = Q_A + Q_C; \quad Q_1 = 50 \text{ л/с} = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Сумма расходов в параллельных трубопроводах равна расходу потребителя C :

$$Q_2 + Q_3 = Q_C; \quad Q_2 + Q_3 = 32 \text{ л/с} = 0,032 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6.42)$$

Пропускная способность четвёртого участка равна расходу потребителя C : $Q_4 = 0,032 \text{ м}^3/\text{с}$.

2. *Приравняем потери напора по длине в параллельных трубопроводах кольца*, чтобы найти распределение расхода в параллельных участках (см. раздел 6.4.2):

$$h_{f_2} = h_{f_3}, \text{ с учётом формулы (5.21): } A_2 Q_2^2 l_2 = A_3 Q_3^2 l_3.$$

Выразим Q_3 через Q_2 : $Q_3 = Q_2 \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_3 l_3}}$.

Согласно данным табл. 9 (см. приложение), для $d_2 = 150$ мм удельное сопротивление $A_2 = 31,18 \text{ с}^2/\text{м}^6$; для $d_3 = 100$ мм значение $A_3 = 265 \text{ с}^2/\text{м}^6$, тогда

$$Q_3 = Q_2 \sqrt{\frac{31,18 \cdot 550}{265 \cdot 400}} = 0,4 Q_2.$$

Подставим Q_3 , выраженное через Q_2 , в формулу (6.42):

$$Q_2 + 0,4 Q_2 = 0,032 \text{ м}^3/\text{с}, \text{ отсюда } Q_2 = 0,023 \text{ м}^3/\text{с}; \text{ значит } Q_3 = 0,009 \text{ м}^3/\text{с}.$$

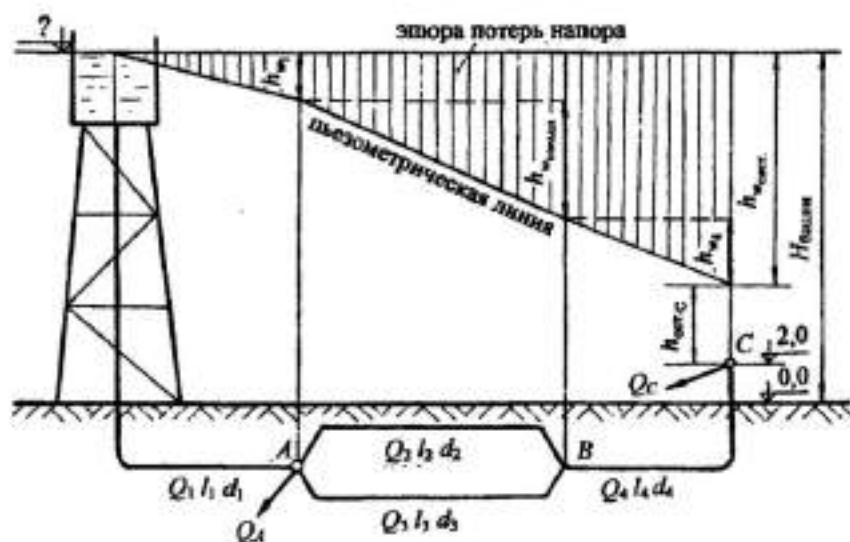


Рис. 6.30

3. Геодезическая высота, или отметка уровня воды в водонапорной башне относительно нулевой отметки (см. рис. 6.30):

$$H_{\text{башни}} = 2,0 + h_{\text{ост.с}} + h_{\text{н.кст.}}$$

Рассчитаем потери напора в системе:

$$h_{\text{сист.}} = 1,1(h_1 + h_{\text{вспом}} + h_{\text{т.}}),$$

где 1,1 – поправочный коэффициент на местные сопротивления, так как по условию задачи потери напора в местных сопротивлениях составляют 10 % от потерь по длине,

$h_{\text{вспом}}$ – потери напора по длине в кольце, их учтём по одной из ветвей, например, по второй: $h_{\text{вспом}} = h_2$.

Потери напора в системе с учётом формулы (5.21):

$$h_{\text{сист.}} = 1,1(A_1 Q_1^2 l_1 + A_2 Q_2^2 l_2 + A_4 Q_4^2 l_4).$$

Рассчитаем потери напора в системе, принимая $A_1 = 2,11 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_4 = 6,78 \text{ с}^2/\text{м}^6$ по табл. 9 (см. приложение):

$$\begin{aligned} h_{\text{сист.}} &= 1,1(2,11 \cdot 0,05^2 \cdot 600 + 31,18 \cdot 0,023^2 \cdot 550 + 6,78 \cdot 0,032^2 \cdot 720) = \\ &= 3,5 + 10,0 + 5,5 = 19,0 \text{ м.} \end{aligned}$$

Для построения пьезометрической линии имеем потери напора на каждом участке:

$$h_{\text{м}} = 3,5 \text{ м}; \quad h_{\text{вспом}} = h_{\text{м}} = h_2 = 10,0 \text{ м}; \quad h_{\text{т.}} = 5,5 \text{ м}.$$

На рис. 6.30 откладываем в масштабе потери напора на каждом участке и строим пьезометрическую (напорную) линию, как показано в разделе 6.4.2.

Находим отметку уровня воды в водонапорной башне:

$$H_{\text{башни}} = 2,0 + 19,0 + 10,0 = 31,0 \text{ м}.$$

Ответ: отметка уровня воды в водонапорной башне равна 31,0 м.

Задача 6.5.2. Тупиковая водопроводная система имеет пять участков труб, длины и диаметры которых указаны на рис. 6.31. В системе четыре потребителя с расходами: $Q_A = 10 \text{ л/с}$; $Q_B = 18 \text{ л/с}$; $Q_C = 12 \text{ л/с}$; $Q_D = 8 \text{ л/с}$; на пятом участке равномерная раздача воды с путевым расходом $Q_{\text{пут.}} = 15 \text{ л/с}$.

Определить высоту водонапорной башни (H), рассчитать диаметры труб на первом и третьем участках системы при условии, что эксплуатационная скорость $v_{\text{эксп.}} \leq 1,4 \text{ м/с}$.

Принять $l_1 = 500$ м; $l_3 = 450$ м; $d_2 = 150$ мм; $l_2 = 550$ м; $d_4 = 125$ мм; $l_4 = 600$ м; $d_5 = 150$ мм; $l_5 = 700$ м. Потери напора в местных сопротивлениях составляют 5 % от потерь по длине.

Построить пьезометрическую линию.

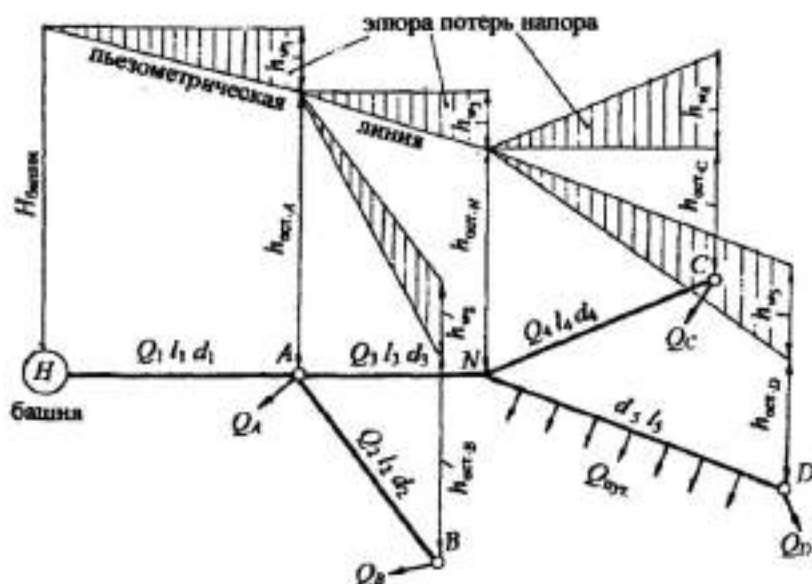


Рис. 6.31

Решение. Воспользуемся *методикой* расчёта тупиковых систем и систем с путевым расходом (см. разделы 6.4.3 и 6.4.4).

1. *Обозначим на схеме* (рис. 6.31) *расходы* на каждом участке с соответствующими индексами и найдём их значение, при этом переводим л/с в м³/с.

Первый участок является магистральным для всех потребителей:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_{\text{пут.}} = 0,063 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Третий участок магистральным для потребителей *С* и *Д* и путевого расхода:

$$Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_{\text{пут.}} = 0,035 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для второго и четвёртого участков:

$$Q_2 = Q_B = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q_4 = Q_C = 0,012 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Рассчитаем *диаметры труб* на первом и третьем участках, пользуясь формулой (6.40):

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_{\text{рас}}}}.$$

Получим:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,063}{3,14 \cdot 1,4}} = 0,239 \text{ м, принимаем } d_1 = 250 \text{ мм};$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,035}{3,14 \cdot 1,4}} = 0,178 \text{ м, принимаем } d_3 = 200 \text{ мм}.$$

3. Определим *потери напора на участках 1-4* с учётом местных сопротивлений по формуле:

$$h_{\Sigma} = 1,05 h_l = 1,05 A Q^2 l.$$

Для всех диаметров труб выбираем значения коэффициентов удельного сопротивления по табл. 9 (см. приложение): $A_1 = 2,11 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_2 = 31,18 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_3 = 6,78 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_4 = 81,6 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_5 = 31,18 \text{ с}^2/\text{м}^6$.

$$\text{Получим } h_{\Sigma 1} = 1,05 \cdot 2,11 \cdot 0,063^2 \cdot 500 = 4,4 \text{ м,}$$

$$\text{по аналогии: } h_{\Sigma 2} = 5,8 \text{ м; } h_{\Sigma 3} = 3,9 \text{ м; } h_{\Sigma 4} = 7,4 \text{ м.}$$

Потери напора на пятом участке с учётом путевого расхода ($Q_{\text{пут.}}$) и транзитного расхода в виде расхода потребителя D (Q_D), согласно формуле (6.41):

$$h_{\Sigma 5} = 1,05 A_5 l_5 \left(Q_D^2 + Q_D Q_{\text{пут.}} + \frac{Q_{\text{пут.}}^2}{3} \right),$$

после подстановки численных значений: $h_{\Sigma 5} = 5,9 \text{ м}.$

Рассчитаем потери напора по трём направлениям к потребителям B ; C и D , принимая последовательное соединение труб:

$$h_{\text{вв}} = h_{\text{вв}-2} = h_{\text{в1}} + h_{\text{в2}} = 10,2 \text{ м};$$

$$h_{\text{вс}} = h_{\text{вв}-3-4} = h_{\text{в1}} + h_{\text{в2}} + h_{\text{в4}} = 15,7 \text{ м};$$

$$h_{\text{вд}} = h_{\text{вв}-3-5} = h_{\text{в1}} + h_{\text{в2}} + h_{\text{в5}} = 14,2 \text{ м}.$$

4. По формуле (6.39) определим *высоту водонапорной башни*:

$$H = (h_{\text{вввв}} + h_{\text{ост}})_{\text{max}},$$

в данной задаче остаточный напор у всех конечных потребителей принимаем равным 10 м, поэтому сравниваем потери напора по всем направлениям и выбираем максимальные, такими являются потери напора до потребителя С:

$$h_{\text{вс}} = h_{\text{вmax}} = 15,7 \text{ м}.$$

Таким образом, высота водонапорной башни

$$H = h_{\text{вс}} + h_{\text{ост-с}} = 15,7 + 10,0 = 25,7 \text{ м}.$$

5. Строим *пьезометрическую линию*. Для первого и третьего участков пьезометрическую линию построим в вертикальной плоскости, для других участков пьезометрическую линию представим в изометрии путём параллельного переноса направления трубопровода (см. рис. 6.31).

Построение можно несколько упростить. Чтобы на чертеже не было наложения извор потерь напора, можно от остаточного напора в точках А и N откладывать потери напора на участках втором, четвёртом и пятом, как представлено на рис. 6.31.

Из построения пьезометрической линии следует, что остаточные напоры у всех потребителей, кроме потребителя С, больше 10,0 м.

Вертикальной штриховкой показана *эпюра потерь напора*.

В примерах решения задач 6.5.1 и 6.5.2 расчёты сложных систем проведены без составления уравнения Бернулли, т.к. эти расчёты аналогичны расчётам простых систем (см. раздел 6.2). На примере решения задачи 6.5.3 представим расчёт сложной системы путём составления уравнения Бернулли.

Задача 6.5.3. Из водонапорной башни A , на поверхности воды в которой действует избыточное давление ($p_{\text{изб}}$), по трём последовательно соединённым трубам подаётся вода трём потребителям с расходами:

$Q_B = 15 \text{ л/с}$; $Q_C = 8 \text{ л/с}$; $Q_D = 12 \text{ л/с}$. Диаметры и длины участков системы принять: $d_1 = 200 \text{ мм}$, $l_1 = 700 \text{ м}$; $d_2 = 150 \text{ мм}$, $l_2 = 600 \text{ м}$; $d_3 = 125 \text{ мм}$, $l_3 = 500 \text{ м}$. Остаточный (свободный) напор у потребителя D должен быть не менее 10 м ($h_{\text{ост.о}} \geq 10 \text{ м}$). Действующий напор водонапорной башни $H = 15 \text{ м}$ считать постоянным (рис. 6.32).

Определить, каким должно быть показание манометра ($p_{\text{ман}}$) на поверхности воды в башне для обеспечения водой потребителей при условии, что местные сопротивления составляют 10% от потерь по длине. Трубы водопроводные нормальные. Построить пьезометрическую линию.

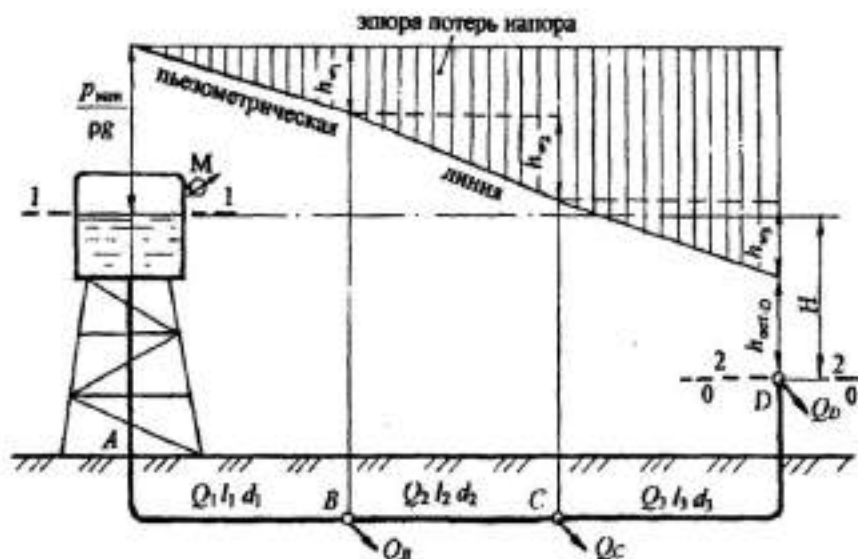


Рис. 6.32

Решение. Для расчёта системы (см. рис. 6.32) воспользуемся уравнением Бернулли по принятой методике (см. раздел 4.5.7).

1. **Выбираем два сечения** по свободной поверхности воды в башне, где скорость воды можно считать равной нулю, и у потребителя D .

2. **Сечения нумеруем по направлению движения воды:** 1-1 по свободной поверхности воды, где установлен манометр, 2-2 по трубопроводу у потребителя D .

3. В выбранных сечениях учитываем абсолютное давление:

$$p_1 = p_a + p_{\text{ман}}; \quad p_2 = p_a + \rho g h_{\text{ост } D}.$$

4. Плоскость сравнения 0-0 совместим с сечением 2-2, тогда $z_1 = H$; $z_2 = 0$.

5. Записываем уравнение Бернулли в общем виде и производим подстановку параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{вс } 1-2};$$

$$z_1 = H;$$

$$z_2 = 0;$$

$$p_1 = p_a + p_{\text{ман}};$$

$$p_2 = p_a + \rho g h_{\text{ост } D};$$

$$v_1 = 0;$$

$$v_2 = v; \quad \alpha_2 = 1,0; \quad h_{\text{вс } 1-2} = h_{\text{сост}}.$$

После подстановки параметров получаем:

$$H + \frac{p_a}{\rho g} + \frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{\rho g h_{\text{ост } D}}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h_{\text{сост}}.$$

Как указано в разделе 6.4, скоростным напором $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$, как малой величиной, можно пренебречь, поэтому после соответствующих сокращений уравнение Бернулли принимает вид:

$$H + \frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = h_{\text{ост } D} + h_{\text{сост}}. \quad (6.43)$$

Прочитаем уравнение (6.43): за счёт избыточного напора $\left(\frac{p_{\text{ман}}}{\rho g}\right)$ на поверхности воды в башне и действующего напора (H) происходят преодоление всех сопротивлений в системе ($h_{\text{сост}}$) и обеспечение остаточного напора у потребителя D ($h_{\text{ост } D}$).

Чтобы рассчитать показание манометра ($p_{\text{ман}}$) в формуле (6.43), следует определить потери напора в системе ($h_{\text{сост}}$).

Воспользуемся методикой расчёта сложных систем (см. раздел 6.4).

1. Распределение расхода. На каждом участке вводим обозначение расхода с индексом, соответствующим индексу диаметра трубы: Q_1 ; Q_2 ; Q_3 .

Рассчитаем расход на каждом участке через расходы потребителей:

$$Q_1 = Q_a + Q_c + Q_D; \quad Q_1 = 35 \text{ л/с} = 0,035 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_2 = Q_c + Q_D; \quad Q_2 = 20 \text{ л/с} = 0,020 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_3 = Q_D; \quad Q_3 = 12 \text{ л/с} = 0,012 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Определим потери напора в системе - $h_{\text{сист}}$. При последовательном соединении труб потери напора на всех участках суммируются (см. раздел 6.4.1). С учётом поправочного коэффициента на местные сопротивления получим:

$$h_{\text{сист}} = 1,1(h_{11} + h_{12} + h_{13}),$$

затем с учётом формулы (5.21):

$$h_{\text{сист}} = 1,1(A_1 Q_1^2 l_1 + A_2 Q_2^2 l_2 + A_3 Q_3^2 l_3). \quad (6.44)$$

Рассчитаем потери напора в системе, принимая $A_1 = 6,78 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_2 = 31,18 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_3 = 81,60 \text{ с}^2/\text{м}^6$ (см. приложение табл. 8).

Для построения пьезометрической (напорной) линии нужно знать потери напора на каждом участке трубопровода, поэтому формулу (6.44) представим в виде трёх слагаемых:

$$h_{\text{м1}} = 1,1 A_1 Q_1^2 l_1; \quad h_{\text{м1}} = 1,1 \cdot 6,78 \cdot 0,035^2 \cdot 700 = 6,4 \text{ м};$$

$$h_{\text{м2}} = 1,1 A_2 Q_2^2 l_2; \quad h_{\text{м2}} = 1,1 \cdot 31,18 \cdot 0,020^2 \cdot 600 = 8,2 \text{ м};$$

$$h_{\text{м3}} = 1,1 A_3 Q_3^2 l_3; \quad h_{\text{м3}} = 1,1 \cdot 81,60 \cdot 0,012^2 \cdot 500 = 6,5 \text{ м}.$$

$$h_{\text{сист}} = 6,4 + 8,2 + 6,5 = 21,1 \text{ м}.$$

Обратимся к формуле (6.43) для определения показания манометра ($p_{\text{ман}}$) на поверхности воды в водонапорной бабле:

$$\frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = h_{\text{сист}} + h_{\text{сстD}} - H;$$

$$\frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = 21,1 + 10 - 15 = 16,1 \text{ м},$$

отсюда $p_{\text{ман}} = 16,1 \rho g = 16,1 \cdot 10^3 \cdot 9,8 = 157 \cdot 10^3 \text{ Па} = 157 \text{ кПа}$.

Показание манометра можно представить в атмосферах, помня, что $1 \text{ ат} = 10 \text{ м вод. ст.}$, получим: $\frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = 16,1 \text{ м}$ соответствует манометрическому давлению $p_{\text{ман}} = 1,61 \text{ ат}$.

Ответ: показание манометра $p_{\text{ман}} = 157 \text{ кПа}$ или $p_{\text{ман}} = 1,61 \text{ ат}$.

Ниже в разделе 6.6 предлагаются задачи для самостоятельной работы, чтобы проверить знания по расчёту сложных трубопроводных систем.

6.6. Задачи для самостоятельной работы по теме "Расчёт сложных трубопроводных систем"

Задача 6.6.1

Водонапорная башня *A* с отметкой 22,0 м питает два потребителя - *B* и *C* - через систему двух последовательно соединённых труб. Пьезометрический напор в конце первого участка $h_p = 15,0$ м. Определить расход воды на первом участке (Q_1) и расход потребителя *C* (Q_C), а также отметку потребителя *C*. Принять расход потребителя *B* $Q_B = 10$ л/с. Диаметры и длины участков водопроводной системы соответственно: $d_1 = 150$ мм, $l_1 = 600$ м; $d_2 = 125$ мм, $l_2 = 500$ м. Трубы водопроводные нормальные. Местные потери напора принять равными 5 % от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию (рис. 6.33).

Ответ: $Q_1 = 19$ л/с; $Q_C = 9$ л/с; отметка потребителя *C* равна 11,5 м.

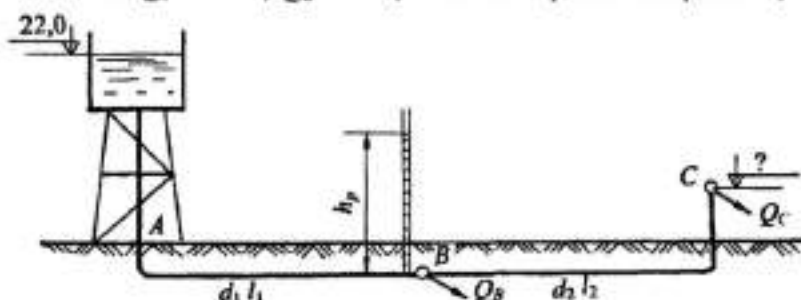


Рис. 6.33

Задача 6.6.2

Из водонапорной башни *A* обеспечиваются водой три потребителя в точках *B*, *C* и *D*. Пропускная способность первого участка $Q_1 = 30$ л/с; расходы потребителей: $Q_B = 12$ л/с; $Q_C = 10$ л/с. Определить расход потребителя *D* (Q_D , л/с), а также отметку свободной поверхности воды в водонапорной башне, если остаточный напор у потребителя *D* ($h_{ост,D}$) должен быть не менее 10 м. Принять диаметры и длины участков труб: $d_1 = 200$ мм, $l_1 = 600$ м; $d_2 = 150$ мм, $l_2 = 500$ м; $d_3 = 125$ мм, $l_3 = 400$ м. Трубы водопроводные нормальные, местные сопротивления составляют 10 % от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию (рис. 6.34).

Ответ: $Q_D = 8$ л/с; отметка свободной поверхности воды в башне 24 м.



Рис. 6.34

Задача 6.6.3

Из водонапорного бака A с избыточным давлением на поверхности $P_{изл} = 19,6$ кПа по трём последовательно соединённым трубам вода подаётся потребителям B , C и D с одинаковыми расходами: $Q_B = Q_C = Q_D = Q$. У потребителя D - выход воды в атмосферу. Определить расход воды на каждом участке трубы, диаметры и длины участков соответственно: $d_1 = 200$ мм, $l_1 = 600$ м; $d_2 = 150$ мм, $l_2 = 500$ м; $d_3 = 125$ мм, $l_3 = 400$ м. Действующий напор $H = 15$ м считать постоянным. Трубы водопроводные нормальные. Местные потери принять равными 10 % от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию (рис. 6.35).

Ответ: $Q_1 = 32,4$ л/с; $Q_2 = 21,6$ л/с; $Q_3 = 10,8$ л/с.

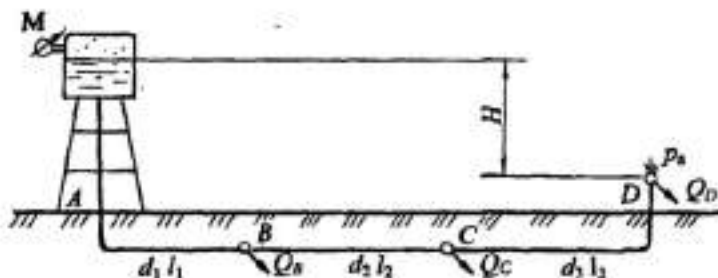


Рис. 6.35

Задача 6.6.4

От насосной установки по трубопроводной системе с параллельным соединением труб вода подаётся двум потребителям - *A* и *B* - с расходами $Q_A = 10$ л/с; $Q_B = 12$ л/с. Длины и диаметры участков системы: $d_1 = 100$ мм, $l_1 = 500$ м; $d_2 = 125$ мм, $l_2 = 700$ м; $d_3 = 125$ мм, $l_3 = 600$ м. Высота подъёма воды у потребителя *B* - $H_B = 8$ м. Определить распределение расходов в параллельных участках труб, а также показание манометра, установленного после насоса ($p_{\text{ман}}$). Местные сопротивления принять равными 5 % от потерь по длине. Считать, что трубы водопроводные нормальные уложены на одном горизонте (рис. 6.36).

Ответ: $q_1 = 0,009$ м³/с; $q_2 = 0,013$ м³/с; $p_{\text{ман}} = 2,55$ ат.

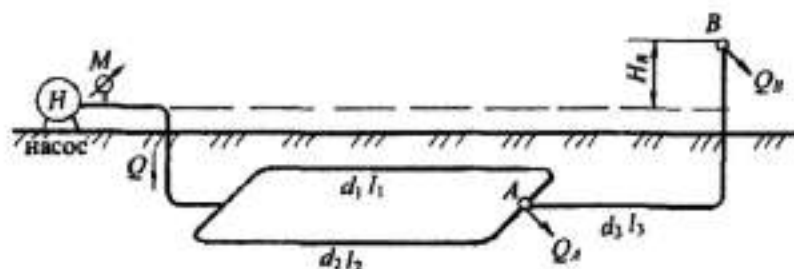


Рис. 6.36

Задача 6.6.5

Тупиковая система, представленная в плане, предназначена для снабжения водой четырех потребителей - *A*, *B*, *C* и *D*. Расходы потребителей: $Q_A = 16$ л/с; $Q_B = 14$ л/с; $Q_C = 12$ л/с; $Q_D = 8$ л/с.

Рассчитать диаметры труб на каждом участке при условии, что средняя скорость в трубах не должна превышать $v_{\text{ср}} = 1,2$ м/с. Определить высоту водонапорной башни *H*, если остаточный напор ($h_{\text{ост}}$) у потребителей должен быть не менее 10 м. Длины участков сети: $l_1 = 700$ м; $l_2 = 400$ м; $l_3 = 600$ м; $l_4 = 350$ м. Трубы водопроводные нормальные. Потери напора в местных сопротивлениях принять равными 10 % от потерь по длине. Построить в аксонометрии пьезометрическую линию (рис. 6.37).

Ответ: высота водонапорной башни $H_{\text{башни}} = 28,7$ м.

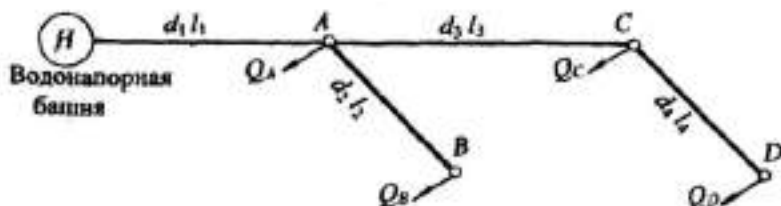


Рис. 6.37

Задача 6.6.6

Два цеха обогатительной фабрики B и C с расходами $Q_B = 20$ л/с и $Q_C = 15$ л/с питаются от насосной установки. Отметки, на которые надо поднять воду у потребителей: $h_B = 12,0$ м; $h_C = 10,0$ м; диаметры и длины трубопроводов: $d_2 = 150$ мм, $l_2 = 500$ м; $d_3 = 125$ мм, $l_3 = 400$ м. Определить расход воды на магистральном участке (Q_1), рассчитать диаметр трубы первого участка (d_1) при условии, что эксплуатационная скорость не должна превышать $v_{\text{max}} = 1,2$ м/с, длина первого участка $l_1 = 600$ м. Рассчитать показание манометра ($p_{\text{ман}}$), установленного после насоса. Трубы водопроводные нормальные. Потери напора в местных сопротивлениях принять равными 10 % от потерь по длине (рис. 6.38).

Ответ: $Q_1 = 35$ л/с; $d_1 = 200$ мм; $p_{\text{ман}} = 2,44$ ат.

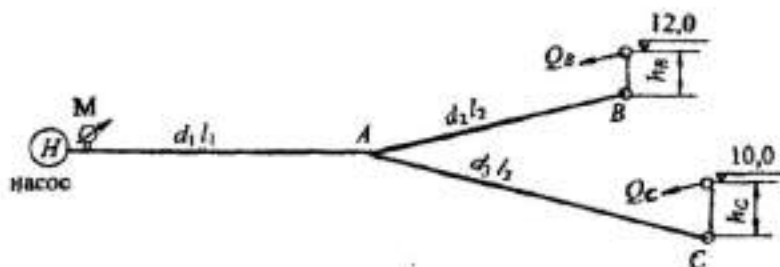


Рис. 6.38

Задача 6.6.7

Система водоснабжения, представленная в плане, имеет три потребителя - A , B и C . Определить расходы воды у потребителей (Q_A , Q_B , Q_C в л/с), если свободные (или остаточные) напоры у потребителей: $h_A = 20$ м; $h_B = 14$ м; $h_C = 15$ м. Показание манометра, установленного после насоса, $p_{\text{ман}} = 2,7$ ат. Потребители расположены на одном горизонте. Диаметры и длины участков сети: $d_1 = 200$ мм, $l_1 = 600$ м; $d_2 = 150$ мм, $l_2 = 500$ м; $d_3 = 125$ мм, $l_3 = 400$ м. Трубы водопроводные нормальные. Потери напора в местных сопротивлениях принять равными 10 % от потерь по длине. Построить в аксонометрии пьезометрическую линию (рис. 6.39).

Ответ: расходы потребителей: $Q_A = 9,0$ л/с; $Q_B = 19,0$ л/с; $Q_C = 12$ л/с.

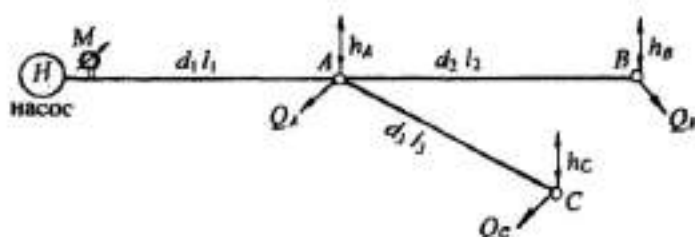


Рис. 6.39

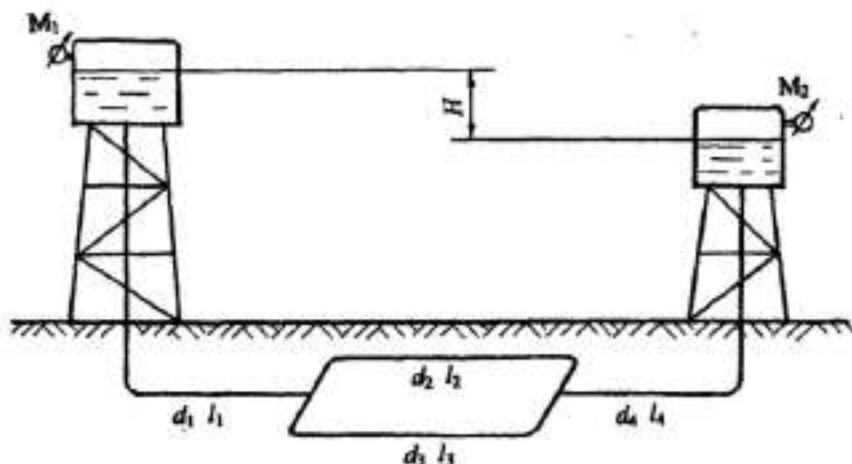
Задача 6.6.8

Определить, каким должно быть давление на поверхности воды в закрытом резервуаре ($p_{\text{ман}1}$), из которого по системе труб с кольцевым соединением вода поступает в другой закрытый резервуар с давлением на поверхности $p_{\text{ман}2} = 0,2$ ат. Общий расход воды в системе $Q = 45,0$ л/с.

Длины и диаметры водопроводной сети: $d_1 = 250$ мм, $l_1 = 500$ м; $d_2 = 150$ мм, $l_2 = 300$ м; $d_3 = 100$ мм, $l_3 = 250$ м; $d_4 = 200$ мм, $l_4 = 400$ м. Разность уровней воды в резервуарах $H = 4$ м. Трубы водопроводные нормальные. Местные сопротивления принять равными 10 % от потерь по длине.

Построить пьезометрическую линию (рис. 6.40).

Ответ: показание манометра в питающем резервуаре $p_{\text{ман}1} \approx 1,76$ ат.



Proc. 6.40

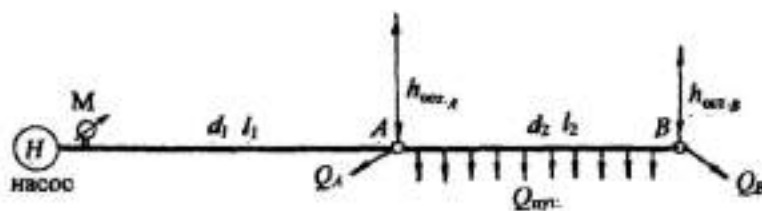
Задача 6.6.9

От насосной установки по двум трубам $d_1 = 250$ мм, $l_1 = 600$ м и $d_2 = 200$ мм, $l_2 = 400$ м вода подается двум потребителям A и B с расходами $Q_A = 30$ л/с; $Q_B = 10$ л/с. На втором участке предусмотрена равномерная раздача воды с путевым расходом $Q_{\text{пут}} = 20$ л/с (рис. 6.41).

Определить остаточные напоры у потребителей A и B , если показание манометра, установленного после насоса, $p_{\text{ман}} = 2,0$ ат.

Трубы водопроводные нормальные. Местные сопротивления принять равными 10 % от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию.

Отвеч: $h_{\text{отв.А}} = 15,0 \text{ м}$; $h_{\text{отв.В}} = 13,7 \text{ м}$.



Proc. 6.41

Задача 6.6.10

Из двух напорных резервуаров - A и C - вода подаётся потребителю B с расходом $Q_B = 10$ л/с. Определить расходы воды из резервуаров Q_A и Q_C , построить пьезометрическую линию, если длины и диаметры участков сети: $d_1 = 100$ мм, $l_1 = 400$ м; $d_2 = 125$ мм, $l_2 = 250$ м. Отметка резервуара A равна 17,8 м, резервуара C - 12,0 м. Трубы водопроводные нормальные. Местные потери принять равными 5 % от потерь по длине (рис. 6. 42).

Ответ: расходы из резервуаров: $Q_A = 7,31$ л/с; $Q_C = 2,69$ л/с.

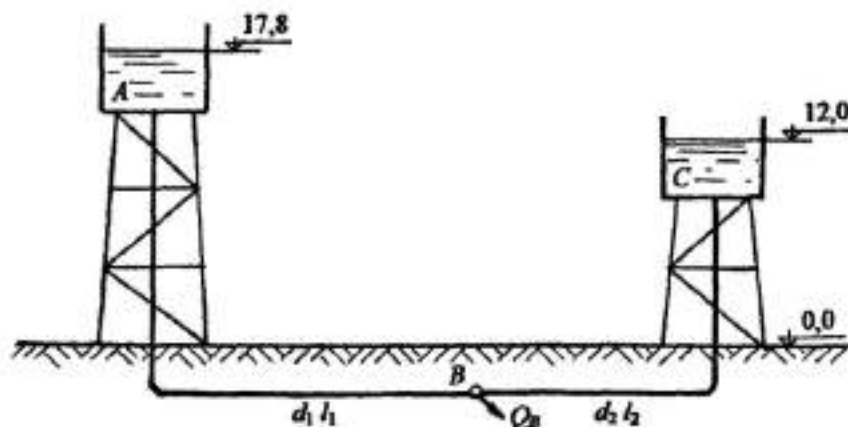


Рис. 6.42

Задача 6.6.11

Насос, дающий подачу $Q = 20$ л/с, перекачивает воду в резервуар по трём параллельным трубам под уровень $H = 3,0$ м. Определить показание манометра ($p_{\text{ман}}$), установленного на линии нагнетания, а также расходы воды в каждой трубе. Принять диаметры и длины параллельных участков сети: $d_1 = 150$ мм, $l_1 = 450$ м; $d_2 = 100$ мм, $l_2 = 400$ м; $d_3 = 125$ мм, $l_3 = 450$ м. Трубы водопроводные нормальные. Местные потери составляют 10 % от потерь по длине (рис. 6.43).

Оценить, как изменится показание манометра, если один или два из параллельных трубопроводов будут отключены.

Ответ: $Q_1 = 10$ л/с; $Q_2 = 3,7$ л/с; $Q_3 = 6,3$ л/с; $p_{\text{ман}} = 0,46$ ат.

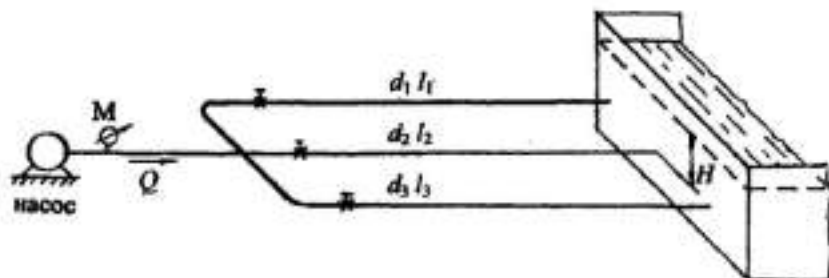


Рис. 6.43

Задача 6.6.12

Из напорного бака *A* вода подаётся двум потребителям - *B* и *C* (рис. 6.44) на отметку 3,0 м при необходимых расходах $Q_B = 10$ л/с; $Q_C = 25$ л/с по трубам: $d_1 = 200$ мм, $l_1 = 500$ м; $d_2 = 200$ мм, $l_2 = 650$ м. На первом трубопроводе предусмотрена непрерывная раздача воды в виде путевого расхода $Q_{\text{пут.}} = 20$ л/с.

Определить отметку уровня воды в напорном баке *A*. Трубы водопроводные нормальные, потери напора в местных сопротивлениях принять равными 10 % от потерь напора по длине.

Ответ: отметка уровня воды в напорном баке равна 6,0 м.

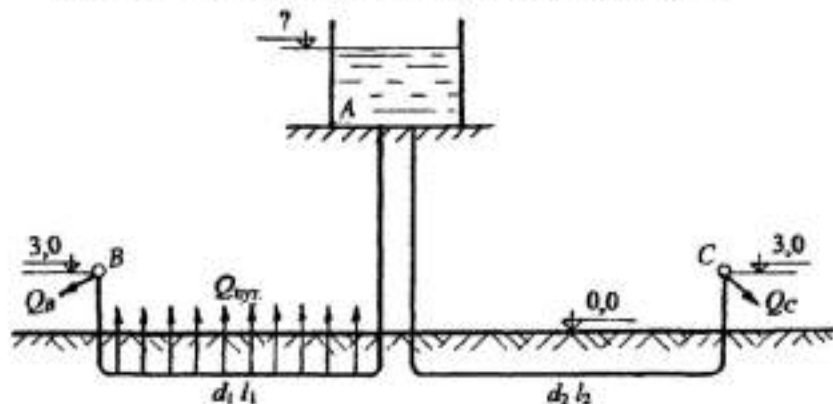


Рис. 6.44

ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ

В инженерной практике часто встречаются случаи истечения жидкости через отверстия и насадки, представляющие собой короткие патрубки различной конфигурации. Путём расчёта истечения жидкости из отверстий и насадков решаются такие технические задачи, как измерение количества проходящей жидкости, создание сильной дальнобойной и компактной струи, распространение свободной струи, конструирование сопел и форсунок и др.

Истечение может происходить при *постоянном* или *переменном напоре*. В первом случае движение жидкости считается установившимся.

Истечение жидкости может происходить в атмосферу и называется *свободным* истечением, а также в другой резервуар, заполненный жидкостью. Такое истечение называется *истечением под уровень* или *истечением через затопленное отверстие*.

Классификация отверстий

1. Малое отверстие в тонкой стенке (незатопленное и затопленное).
2. Малое отверстие в толстой стенке. Аналогом является короткий патрубок длиной $l = (3 + 5)d_{отк}$ ($d_{отк}$ – диаметр отверстия), присоединённый к малому отверстию.
3. Большое отверстие в тонкой стенке.

Малым считается отверстие, если разность напоров над верхней и нижней кромками отверстия не превышает 10 % вертикального размера отверстия. *Действующий напор принимается по оси отверстия*.

В противном случае, если разность напоров над верхней и нижней кромками отверстия превышает 10 %, отверстие считается *большим*. При расчёте такого отверстия учитываются напоры над верхней и нижней кромками отверстия.

Тонкой считается стенка, если толщина её (δ) не превышает трёх линейных размеров отверстия. Например, для круглого отверстия $\delta \leq 3 d_{отк}$; для квадратного отверстия $\delta \leq 3a$ (a – сторона квадрата).

Толстой считается стенка, толщина которой $\delta = (3 + 5)d_{отк}$. Если толстую стенку убрать, оставить только ограничение, например, в виде патрубка, то такой патрубок называется *гидравлическим насадком*.

Итак, *гидравлический насадок* – это короткий патрубок длиной $l = (3 + 5)d$, присоединённый к малому отверстию в тонкой стенке.

Если длина патрубка $l > 5d$, то такое движение жидкости следует рассматривать как движение в короткой трубе.

Рассмотрим *теоретические основы* расчёта истечения жидкости через отверстия и насадки.

7.1. Истечение жидкости из малого незатопленного и затопленного отверстий в тонкой стенке

Под расчётом отверстия понимается определение пропускной способности отверстия, или расхода (Q).

Рассмотрим малое отверстие в тонкой стенке закрытого резервуара, на поверхности жидкости в котором действует абсолютное давление p_0 , в общем случае не равное атмосферному (рис. 7.1, а). Площадь живого сечения отверстия ω , действующий напор по оси отверстия H , уровень воды в резервуаре постоянный.

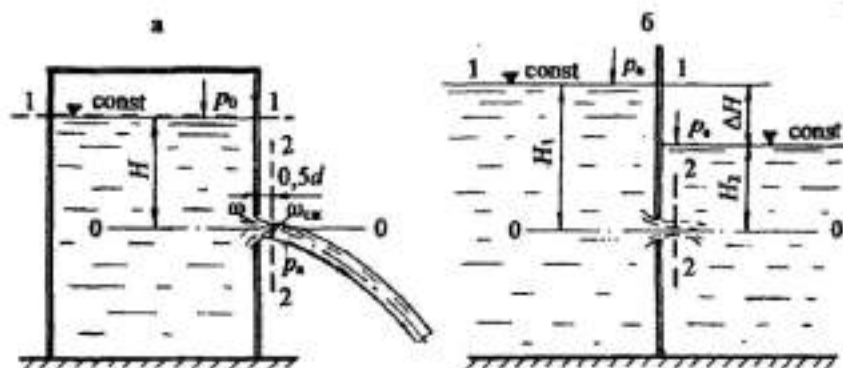


Рис. 7.1

При истечении жидкости через малое отверстие на расстоянии $0,5d$ происходит *сжатие* (инверсия) струи. Это явление объясняется инерцией частиц жидкости, параболической траекторией струек в потоке, которые пересекаются, уменьшая при этом сечение. В сжатом сечении (площадь $\omega_{сж}$) движение жидкости можно считать установившимся и применить для него уравнение Бернулли.

Для определения расхода жидкости через малое незатопленное отверстие, т. е. свободное истечение в атмосферу, используем уравнение Бернулли, согласно принятой методике (см. раздел 4.5.7).

1. **Выберем два сечения:** по свободной поверхности жидкости в резервуаре, проведём его горизонтально, здесь скорость $v = 0$, и на выходе струи в атмосферу по сжатому сечению, это сечение проведём нормально к направлению движения струи.

2. Сечения 1-1 и 2-2 **произмерим по направлению движения жидкости.**

3. В выбранных сечениях учтём *абсолютное давление*. Подчеркнём, что давление в сжатом сечении равно атмосферному (выход жидкости в атмосферу): $p_1 = p_0$; $p_2 = p_a$.

4. Плоскость сечения 0-0 проведём через ось отверстия, тогда $z_1 = H$; $z_2 = 0$.

5. Запишем уравнение Бернулли (см. формулу (4.15)) в общем виде и сделаем подстановку параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w, 2};$$

$$\begin{array}{ll} z_1 = H; & z_2 = 0; \\ p_1 = p_0; & p_2 = p_a; \\ v_1 = 0; & v_2 = v_{\text{сж}}; \alpha_2 = \alpha_{\text{отк}}; \end{array}$$

где $\alpha_{\text{отк}}$ — коэффициент неравномерности распределения скорости в отверстии.

Потери напора по длине между сечениями 1-1 и 2-2 (расстояние $0,5d$) отсутствуют, значит, потери напора в гидравлических сопротивлениях (h_w) учтём, как потери напора в самом отверстии, как местном сопротивлении:

$$h_w = h_{\text{отк}} = \zeta_{\text{отк}} \frac{v_{\text{сж}}^2}{2g},$$

где $\zeta_{\text{отк}}$ — коэффициент сопротивления отверстия.

После подстановки параметров получим:

$$H + \frac{p_0}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{\alpha_{\text{отк}} v_{\text{сж}}^2}{2g} + \zeta_{\text{отк}} \frac{v_{\text{сж}}^2}{2g},$$

откуда скорость в сжатом сечении:

$$v_{\text{сж}} = \sqrt{\frac{1}{\alpha_{\text{отк}} + \zeta_{\text{отк}}}} \sqrt{2g \left(H + \frac{p_0 - p_a}{\rho g} \right)}. \quad (7.1)$$

В формуле (7.1) обозначим приведённый напор ($H_{\text{прив}}$):

$$H_{\text{прив}} = H + \frac{p_0 - p_a}{\rho g}.$$

Если резервуар будет открытым, в сечении 1-1 давление $p_1 = p_n$ то приведённый напор $H_{прв} = H$.

Формулу (7.1) представим в виде:

$$v_{сж} = \sqrt{\frac{1}{\alpha_{отв} + \zeta_{отв}}} \sqrt{2gH_{прв}}. \quad (7.2)$$

Введём коэффициент скорости (φ):

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{\alpha_{отв} + \zeta_{отв}}}. \quad (7.3)$$

Формула (7.2) принимает вид:

$$v_{сж} = \varphi \sqrt{2gH_{прв}}. \quad (7.4)$$

При расчёте расхода Q (или пропускной способности) из отверстия нужно скорость в сжатом сечении умножить на площадь сжатого сечения:

$$Q = v_{сж} \omega_{сж}.$$

Уменьшение площади сжатого сечения учитывается *коэффициентом сжатия* — ε :

$$\varepsilon = \frac{\omega_{сж}}{\omega}. \quad (7.5)$$

Расчётная формула для расхода с учётом формул (7.4) и (7.5):

$$Q = \varepsilon \varphi \omega \sqrt{2gH_{прв}}. \quad (7.6)$$

Произведение коэффициентов $\varepsilon \varphi$ обозначим через $\mu_{отв}$, который называется коэффициентом расхода отверстия:

$$\mu_{отв} = \varepsilon \varphi.$$

Окончательно расход жидкости через малое незатопленное отверстие рассчитывается по формуле

$$Q = \mu_{отв} \omega \sqrt{2gH_{прв}}. \quad (7.7)$$

Рассмотрим малое *затопленное* отверстие в тонкой стенке, или истечение из малого отверстия *под уровень* (рис. 7.1, б).

Расчёт аналогичен расчёту малого отверстия в тонкой стенке с истечением в атмосферу. Также составляется уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2, скорости в которых соответственно: $v_1 = 0$; $v_2 = v_{\text{сж}}$; давления в выбранных сечениях: $p_1 = p_a$; $p_2 = p_a + \rho g H_2$; плоскость сравнения совмещается с осью отверстия: $z_1 = H_1$; $z_2 = 0$.

После преобразования уравнения Бернулли (предлагается сделать самостоятельно)

$$v_{\text{сж}} = \varphi \sqrt{2g(H_1 - H_2)}. \quad (7.8)$$

Можно обозначить $H_1 - H_2 = \Delta H$, таким образом, ΔH – действующий напор для затопленного отверстия. Расход жидкости через затопленное отверстие:

$$Q = \mu_{\text{сж}} \omega \sqrt{2g\Delta H}. \quad (7.9)$$

Формулы (7.7); (7.9), а ранее при расчёте простых трубопроводных систем формула (6.5) имеют общий вид. Таким образом, для всех видов истечений из отверстий и насадков формула расхода может быть представлена обобщённой формулой:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad (7.10)$$

где H – действующий (или приведённый) напор.

7.2. Истечение жидкости через большое боковое отверстие при постоянном напоре

Представим себе большое боковое отверстие прямоугольной формы, ширина которого b , напор над верхней кромкой отверстия H_1 , над нижней H_2 . Пусть напоры над верхней и нижней кромками отверстия отличаются более, чем на 10 %, тогда в формуле расхода учитываем оба напора:

$$Q = \frac{2}{3} \mu_{\text{сж}} b \sqrt{2g} (H_2^{3/2} - H_1^{3/2}). \quad (7.11)$$

Теоретический вывод формулы (7.11) следует изучать по учебникам и другим учебным пособиям.

7.3. Истечение жидкости из насадков при постоянном напоре

По форме патрубка различают следующие *типы насадков*:

- а) внешний цилиндрический насадок (рис. 7.2, а);
- б) внутренний цилиндрический насадок (рис. 7.2, б);
- в) конический сходящийся насадок (рис. 7.2, в);
- г) конический расходящийся насадок (рис. 7.2, г);
- д) коноидальный насадок (рис. 7.2, д).

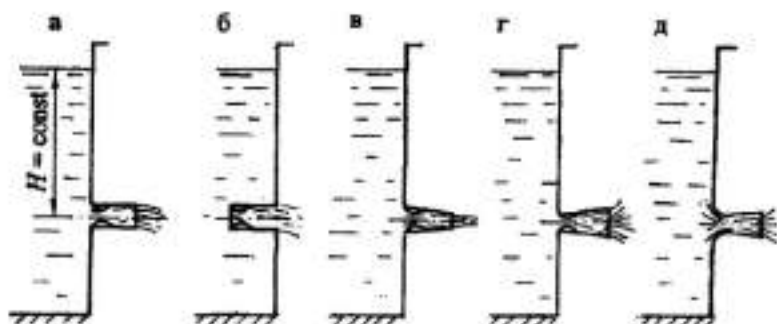


Рис. 7.2

Во всех типах насадков, кроме коноидального, *внутри насадка*, как правило, на расстоянии $0,5d$ *образуется сжатие струи*. В области сжатия возникает вакуум, затем струя расширяется, заполняет весь насадок и выходит полным сечением.

Наличие вакуума внутри насадка доказывается с помощью уравнения Бернулли, такие расчёты приведены в учебниках и курсах лекций.

Вакуум внутри *внешнего цилиндрического* насадка способствует дополнительному подосу жидкости и увеличению пропускной способности насадка. Так, в цилиндрическом внешнем насадке $H_{\text{вак.}} = 0,75 H$, значит, согласно формуле (7.7):

$$Q = \mu_{\text{отк.}} \omega \sqrt{2g(H + H_{\text{вак.}})} = \mu_{\text{отк.}} \omega \sqrt{2g \cdot 1,75 H}.$$

Зная, что $\sqrt{1,75} = 1,32$, обозначим $1,32\mu_{\text{отк.}} = \mu_{\text{вак.}}$. Следовательно, пропускная способность внешнего цилиндрического насадка увеличится на 32%, действительно, $\mu_{\text{отк.}} = 0,62$; $\mu_{\text{вак.}} = 1,32 \cdot 0,62 = 0,82$.

Таким образом, *назначение насадков – увеличение пропускной способности*.

Внутренний цилиндрический насадок используется, когда нужно увеличить пропускную способность, но по техническим условиям нельзя вывести внешний насадок.

Конический сходящийся насадок даёт возможность получить компактную струю с большой скоростью, используется в гидромониторах, брандспойтах и им подобных устройствах. Коэффициент расхода насадка зависит от угла конусности. Оптимальное значение угла конусности $13^{\circ}24'$.

Конический расходящийся насадок даёт увеличение пропускной способности на 40+45 %, малые скорости на выходе. Эти насадки применяются в эжекторных установках, оросительных системах и др.

Оптимальный угол конусности $5^{\circ}+7^{\circ}$. При увеличении угла конусности происходит срыв вакуума внутри насадка, струя отходит от стенок насадка, насадок не выполняет своего назначения, истечение происходит, как через малое отверстие.

Конусообразный насадок выполнен по форме струи, вытекающей из малого отверстия, имеет малое сопротивление при движении жидкости, обеспечивает повышение пропускной способности на 40+50 %. Такие насадки применяются в соплах гидравлических турбин, аэродинамических установках.

При теоретических обоснованиях истечения жидкости из отверстий и насадков были введены коэффициенты: α , ζ , φ , ϵ , μ . Значения этих коэффициентов зависят от многих факторов: формы отверстия, степени механической обработки кромок отверстия, полноты и совершенства сжатия струи, а также от числа Рейнольдса (Re). Эти коэффициенты определены экспериментально или рассчитаны аналитически. Значения коэффициентов приведены в справочниках и учебниках. В данном учебном пособии значения коэффициентов φ , ϵ и μ приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Значения коэффициентов скорости (φ), сжатия (ϵ) и расхода (μ) для отверстий и насадков

Вид отверстия, насадка	φ	ϵ	μ
Малое отверстие	0,97	0,64	0,62
Внешний цилиндрический насадок	0,82	1,0	0,82
Внутренний цилиндрический насадок	0,71	1,0	0,71
Конический сходящийся насадок	0,96	0,98	0,94
Конический расходящийся насадок	0,45	1,0	0,45
Конусообразный насадок	0,97	1,0	0,97

7.4. Пример решения задачи по теме: “Истечение жидкости из отверстий и насадков”

Задача 7.4.1. На водонапорной станции установлен трёхкамерный отстойник. В стенках отстойника сделаны отверстия с площадями живых сечений: $\omega_1 = 3 \text{ дм}^2$; $\omega_2 = 2 \text{ дм}^2$; к третьему отверстию присоединён внешний цилиндрический насадок площадью сечения $\omega_3 = 1,2 \text{ дм}^2$. Уровни воды в камерах постоянны. Общий напор $H = 3,0 \text{ м}$.

Определить распределение напоров h_1 , h_2 , h_3 и расход воды (Q), вытекающей из отстойника. Считать стенки отстойника тонкими (рис. 7.3).

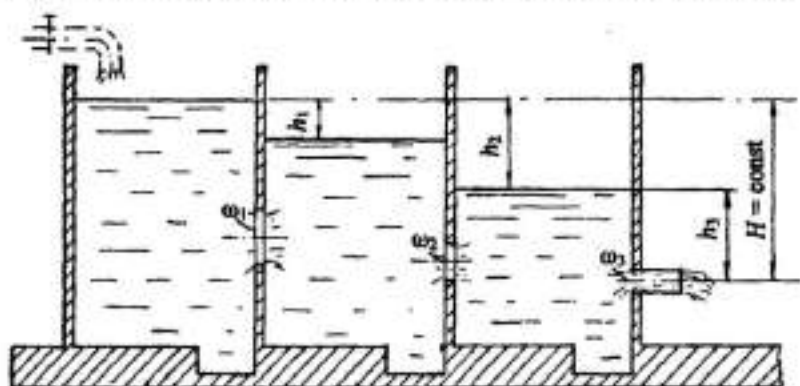


Рис. 7.3

Решение. Из рис. 7.3 следует:

$$H = h_2 + h_3, \quad (7.12)$$

Согласно уравнению неразрывности потока, расходы воды через отверстия и насадок одинаковы:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \text{const}.$$

Расходы воды через каждое отверстие можно вычислить по формуле (7.10), а именно:

$$Q_1 = \mu_{\text{отв}1} \omega_1 \sqrt{2gh_1};$$

$$Q_2 = \mu_{\text{отв}2} \omega_2 \sqrt{2g(h_2 - h_1)};$$

$$Q_3 = \mu_{\text{нас}} \omega_3 \sqrt{2gh_3}.$$

Приравняем расходы и, произведя простые преобразования (сократим на величину $\sqrt{2g}$), получим:

$$\mu_{отк1} \omega_1 \sqrt{h_1} = \mu_{отк2} \omega_2 \sqrt{h_2 - h_1} = \mu_{отк3} \omega_3 \sqrt{h_3}. \quad (7.13)$$

Подставим численные значения площадей живых сечений (ω) и коэффициентов расхода (μ) из табл. 7.1:

$$0,62 \cdot 3,0 \sqrt{h_1} = 0,62 \cdot 2,0 \sqrt{h_2 - h_1} = 0,82 \cdot 1,2 \sqrt{h_3}.$$

Приравняем попарно равенства, чтобы найти зависимости между напорами h_1, h_2, h_3 , а затем решить их совместно с уравнением (7.12):

$$9h_1 = 4(h_2 - h_1), \text{ отсюда } h_2 = 3,25 h_1;$$

$$3,46 h_1 = 0,97 h_3, \text{ отсюда } h_3 = 3,57 h_1.$$

Подставим значения h_2 и h_3 , выраженные через h_1 , в уравнение (7.12):

$$3,25 h_1 + 3,57 h_1 = 3,0 \text{ м, отсюда } h_1 = 0,44 \text{ м, значит, } h_2 = 1,43 \text{ м; } h_3 = 1,57 \text{ м.}$$

Расход воды можно рассчитать через любое отверстие; рассчитаем через первое:

$$Q = Q_1 = 0,62 \cdot 0,03 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,44} = 0,0546 \text{ м}^3/\text{с} = 54,6 \text{ л/с.}$$

Ответ: напоры воды в отстойнике: $h_1 = 0,44 \text{ м; } h_2 = 1,43 \text{ м; } h_3 = 1,57 \text{ м;}$
расход воды из отстойника $Q = 54,6 \text{ л/с.}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное учебное пособие составлено на основании многолетнего преподавания курса гидромеханики (гидравлики). Опыт методической работы показал, что успешное овладение знаниями по этому курсу возможно только на основе решения задач. Решение задач развивает самостоятельное инженерное мышление.

На сегодняшний день имеется немало сборников задач и учебных пособий по гидравлике, тем не менее в этих изданиях недостаточно освещена методика решения задач по различным разделам и темам. Для студентов очень важно усвоить именно методику решения задач, чтобы перейти от решения простых к более сложным задачам.

При разработке учебного пособия ставилась цель – добиться наиболее последовательного и широкого применения методики решения задач. Во многих задачах использованы графические методы решения, дающие возможность просто и наглядно проанализировать ход решения задачи и конечный результат решения.

В учебном пособии даны только основы теории по нескольким разделам гидромеханики, поэтому, само собой разумеется, студент должен обращаться к учебникам по этому курсу.

Кроме таблиц, приведённых в приложении, можно пользоваться аналогичными таблицами других учебников и учебных пособий, в этом случае ответы в задачах могут незначительно отличаться.

Автор надеется, что учебное пособие представит интерес и принесёт пользу в изучении курса гидромеханики. Возможно, книга будет использована преподавателями вузов для проведения практических занятий.

Хотелось бы получать отзывы на книгу, замечания, пожелания.

Автор С. И. Час

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Альтшуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов Л. П. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1987. 497 с.

Андреевская А. В., Кременецкий Н. Н., Панова М. В. Задачник по гидравлике. М.: Энергия, 1970. 567 с.

Гейер В. Г., Дулин В. С., Заря А. Н. Гидравлика и гидропривод. 4-е изд. М.: Недра, 1991. 331 с.

Гидравлика и гидропривод: Учеб. пособие / Н. С. Гудалин, Е. М. Кривенко, В. С. Маховиков, И. Л. Постоев; Под ред. И. Л. Постоева. 2-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГУ, 2001. 520 с.

Примеры расчётов по гидравлике: Учеб. пособие/Под ред. А. Д. Альтшуля. М.: Стройиздат, 1976. 256 с.

Сборник задач по машиностроительной гидравлике: Учеб. пособие/Под ред. И. И. Куколевского и Л. Г. Подвижа. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1981. 464 с.

Чугаев Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости). Л.: Энергоиздат, 1982. 552 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Плотность, коэффициент кинематической вязкости, условная вязкость некоторых жидкостей

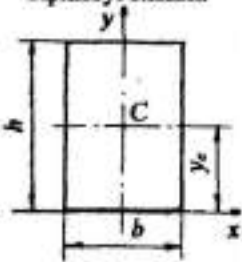
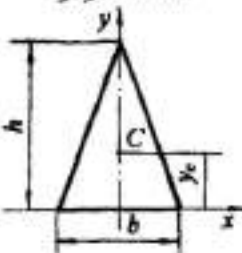
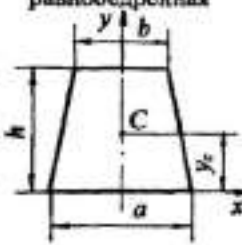
Жидкость	Плотность ρ , кг/м ³	Кинематический коэффициент вязкости ν , 10 ⁻⁶ м ² /с	Условная вязкость °E (ВУ)
Вода пресная	998	1,008	1,0
Этиловый спирт	790	1,52	1,04
Ртуть	13546	0,16	-
Воздух	1,22	14,9	-
Бензин при $t = 15^\circ\text{C}$	740-780	0,83-0,93	-
Керосин	820	2,5	1,13
Нефть	810-930	25,0-27,0	3,7-4,0
Масло турбинное	900	20,0-48,0	3,0-6,7
Масло трансформаторное	884	28,0-30,0	4,05-4,30

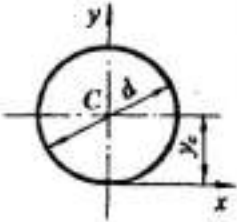
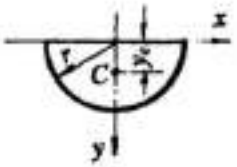
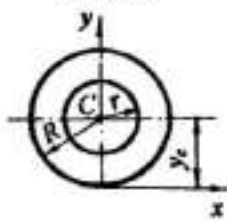
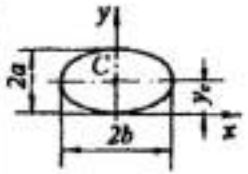
Таблица 2

Соотношение между единицами давления

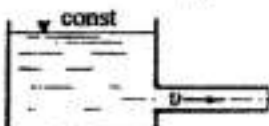
Единица	Па (Н/м ²)	кгс/см ² (ат)	кгс/м ²	мм вод. ст.	м вод. ст.	мм рт. ст.	бар
1 Па (Н/м ²)	1	$10,2 \cdot 10^{-6}$	0,102	0,102	$102 \cdot 10^{-6}$	$750 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}
1 кгс/см ² (ат)	$9,81 \cdot 10^4$	1	10^4	10^4	10	735,6	0,981
1 кгс/м ²	9,81	10^{-4}	1	1	10^{-3}	$73,56 \cdot 10^{-3}$	$98,1 \cdot 10^{-4}$
1 мм вод. ст.	9,81	10^{-4}	1	1	10^{-3}	$73,56 \cdot 10^{-3}$	$98,1 \cdot 10^{-6}$
1 м вод. ст.	$9,81 \cdot 10^3$	0,1	10^3	10^3	1	73,56	$98,1 \cdot 10^{-3}$
1 мм рт. ст.	133,3	$1,36 \cdot 10^{-3}$	13,6	13,6	$13,6 \cdot 10^{-3}$	1	$1,33 \cdot 10^{-3}$
1 бар	10^5	1,02	$10,2 \cdot 10^3$	$10,2 \cdot 10^3$	10,2	750	1

Координаты центров тяжести, площади и моменты инерции плоских фигур относительно горизонтальной центральной оси

Плоская фигура	Координата центра тяжести y_c	Площадь фигуры A	Момент инерции I_x
Прямоугольник 	$\frac{h}{2}$	bh	$\frac{bh^3}{12}$
Треугольник 	$\frac{1}{3}h$	$\frac{bh}{2}$	$\frac{bh^3}{36}$
Трапеция равнобедренная 	$\frac{h(a+2b)}{3(a+b)}$	$\frac{h(a+b)}{2}$	$\frac{h^3(a^2+4ab+b^2)}{36(a+b)}$

Круг 	$\frac{d}{2}$	$\frac{\pi d^2}{4}$	$\frac{\pi d^4}{64}$
Полукруг 	$\frac{4r}{3\pi}$	$\frac{\pi r^2}{2}$	$\frac{9\pi^2 - 64}{72\pi} \cdot r^4$
Кольцо 	R	$\pi(R^2 - r^2)$	$\frac{\pi(R^4 - r^4)}{4}$
Эллипс 	a	πab	$\frac{\pi a^3 b}{4}$

Местные сопротивления

Тип, схема местного сопротивления	Коэффициент местного сопротивления ζ														
Вход в трубу $h_{\text{вх}} = \zeta_{\text{вх}} \frac{v^2}{2g}$ 	При острых кромках $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$; при закруглённых кромках и плавном входе $\zeta_{\text{вх}} = 0,2$; при весьма плавном входе $\zeta_{\text{вх}} = 0,05$														
Внезапное расширение $h_{\text{в.р.}} = \zeta_{\text{в.р.}} \frac{v_1^2}{2g}$ 	$\zeta_{\text{в.р.}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2$														
Выход из трубы в резервуар больших размеров, выход под уровень $h_{\text{вых}} = \zeta_{\text{вых}} \frac{v_1^2}{2g}$ 	$\zeta_{\text{вых}} = 1,0$														
Внезапное сужение $h_{\text{с.с.}} = \zeta_{\text{с.с.}} \frac{v_1^2}{2g}$ 	$\zeta_{\text{с.с.}} = f \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)$ <table><tr><td>$\frac{\omega_2}{\omega_1}$</td><td>0,01</td><td>0,10</td><td>0,20</td><td>0,40</td><td>0,60</td><td>0,80</td></tr><tr><td>$\zeta_{\text{с.с.}}$</td><td>0,50</td><td>0,45</td><td>0,40</td><td>0,30</td><td>0,20</td><td>0,10</td></tr></table>	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	$\zeta_{\text{с.с.}}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,10
$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80									
$\zeta_{\text{с.с.}}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,10									

Местные сопротивления

Поворот трубы (колесо)
а) колесо без закругления



Угол α°	30	40	50	60	70	80	90
$\zeta_{\text{закр.}}$	0,20	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90	1,10

б) колесо с закруглением
при $\alpha = 90^\circ$

$$h_{\text{закр.}} = \zeta_{\text{закр.}} \frac{v^2}{2g}$$



$r/R_{\text{закр.}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$\zeta_{\text{закр.}}$	0,131	0,138	0,158	0,206	0,294
$r/R_{\text{закр.}}$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\zeta_{\text{закр.}}$	0,440	0,661	0,977	1,408	1,978

При углах $\alpha \neq 90^\circ$ значение $\zeta_{\text{закр.}}$ нужно умножить на $\alpha/90^\circ$

Задвижка Лудло



a/d	Полное открытие	1/4	3/8	
$\zeta_{\text{закр.}}$	0,12	0,28	0,81	
a/d	1/2	5/8	3/4	7/8
$\zeta_{\text{закр.}}$	2,06	5,25	17,0	978

Пробковый кран, $Re \geq 10^4$



α°	5	10	20	30
$\zeta_{\text{кр.}}$	0,05	0,29	1,56	5,47
α°	40	50	60	
$\zeta_{\text{кр.}}$	17,3	52,6	206	

Местные сопротивления

Вентиль

Полностью открытый, $Re \geq 10^4$

d , мм	40	80	100	150	200	250	300
$\zeta_{\text{вент.}}$	4,9	4,0	4,1	4,4	4,7	5,1	5,4

Диафрагма в трубе

$Re > 10^4$

$\frac{d_0^2}{d^2}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$\zeta_{\text{диаф.}}$	224	60,2	19,2	9,8	4,4	2,4	1,22

Всасывающий клапан с сеткой, $Re > 10^4$

d , мм	40	70	100	200	300	500
$\zeta_{\text{сетк.}}$	12	8,5	7,0	4,7	3,7	2,5

Для ориентировочных расчётов:

при наличии обратного клапана $\zeta_{\text{сетк.}} = 10,0$;

при отсутствии обратного клапана $\zeta_{\text{сетк.}} = 5 + 6$

Таблица 5

Коэффициенты сопротивления колен водопроводных труб при $\alpha = 90^\circ$

d , мм	50	100	150	200	250	300
$\zeta_{\text{колен.}}$	0,76	0,39	0,37	0,37	0,40	0,45
d , мм	350	400	450	500	600	700
$\zeta_{\text{колен.}}$	0,45	0,42	0,42	0,46	0,47	0,48

Значения эквивалентной абсолютной шероховатости Δ_s в трубах

Материал и вид трубы	Состояние трубы	Δ_s , мм
Тянутые из стекла и цветных металлов	Новые, технически гладкие	0,001
Бесшовные стальные	Новые и чистые, тщательно уложенные	0,014
	После нескольких лет эксплуатации	0,2
Стальные сварные	Новые и чистые	0,06
	С незначительной коррозией после очистки	0,15
	Умеренно заржавевшие	0,5
	Старые заржавевшие	1
	Сильно заржавевшие или с большими отложениями	3
Чугунные	Новые асфальтированные	0,12
	Новые без покрытия	0,3
	Бывшие в употреблении	1
	Очень старые	3
Бетонные	Новые из предварительно напряженного бетона	0,03
	Новые центробежные	0,2
	Бывшие в употреблении	0,3 +0,8
	Из необработанного бетона	1-3

Значения коэффициентов шероховатости n и $1/n$
(для формул Павловского, Агроскина, Маннинга)

Категория	Характеристика поверхности	n	$1/n$
I	Исключительно гладкие поверхности, покрытые эмалью	0,09	111
II	Весьма тщательно остроганные доски, хорошо пригнанные. Штукатурка из чистого цемента	0,010	100
III	Лучшая цементная штукатурка. Чистые новые гончарные, чугунные и железные трубы, хорошо уложенные и соединенные	0,011	90,9
IV	Неостроганные доски, хорошо пригнанные. Водопроводные трубы в нормальных условиях; весьма чистые водопроводные трубы; весьма хорошая бетонировка	0,012	83,3
V	Тесовая кладка, хорошая кирпичная кладка. Водосточные трубы в нормальных условиях. Несколько загрязненные водопроводные трубы	0,013	76,9
VI	Загрязненные трубы (водопроводные и водосточные); средняя кирпичная кладка, бетонировка каналов в средних условиях	0,014	71,4
VII	Средняя кирпичная кладка, облицовка из тесаного камня в средних условиях. Значительно загрязненные водостоки. Брезент по деревянным рейкам	0,015	66,7
VIII	Хорошая бутовая кладка, старая кирпичная кладка, сравнительно грубая бетонировка. Гладкая, весьма хорошо разработанная скала	0,017	58,8

Таблица 8

Значения величин C , λ , K и $1/K^2 = A$ для нормальных водопроводных труб, подсчитанные по формуле акад. Н. Н. Павловского при $n = 0,012$

d , мм	C	λ	K , м ³ /с	A , с ² /м ⁵
50	44,79	0,0391	0,00987	10340,0
75	47,45	0,349	0,0287	1214,0
100	49,48	0,0321	0,0614	265,0
125	51,07	0,0301	0,111	81,60
150	52,42	0,0286	0,179	31,18
200	54,62	0,0263	0,384	6,78
250	56,40	0,0247	0,692	2,11
300	57,90	0,0234	1,121	0,794
350	59,18	0,0224	1,684	0,354
400	60,31	0,0216	2,397	0,174
450	61,28	0,0209	4,259	0,0932
500	62,28	0,0202	4,324	0,0532
600	63,91	0,0192	6,999	0,0204
700	65,32	0,0184	10,517	0,00904
800	66,58	0,0177	14,965	0,00495
900	67,70	0,0170	20,430	0,00239
1000	68,72	0,0166	26,485	0,00137

Таблица 9

Значение коэффициента удельного сопротивления A (с²/м⁶) для расчёта трубопроводов (при квадратичном законе сопротивления) в зависимости от абсолютной шероховатости Δ

Диаметр d , мм	$\Delta = 0,2$ мм	$\Delta = 0,5$ мм	$\Delta = 1,0$ мм
50	7570	10 000	12 900
75	886	1 160	1 460
100	194	252	313
125	62,6	80,0	95,2
150	23,1	29,3	36,2
200	5,08	6,45	7,81
250	1,58	1,98	2,40
300	0,607	0,709	0,917
400	0,135	0,167	0,201
500	0,0422	0,0518	0,062

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖИДКОСТЯХ.....	4
Раздел первый. ГИДРОСТАТИКА.....	6
Глава 1. ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ В ЖИДКОСТИ.....	6
1. Понятие гидростатического давления.....	6
1.1. Свойства гидростатического давления.....	6
1.2. Основное уравнение гидростатики. Абсолютное манометрическое, вакуумметрическое давление.....	6
1.3. Плоскость уровня. Понятие пьезометрической высоты. Эпюры гидростатического давления.....	7
1.4. Единицы измерения давления.....	9
1.5. Примеры решения задач по теме: "Гидростатическое давление в жидкости".....	10
1.6. Задачи для самостоятельной работы по теме: "Гидростатическое давление в жидкости".....	15
Глава 2. СИЛА ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ.....	22
2.1. Аналитический метод определения силы давления жидкости....	22
2.2. Графо-аналитический метод расчёта силы давления и центра давления на прямоугольные поверхности.....	23
2.3. Примеры решения задач по теме: "Расчёт силы давления жидкости на плоские поверхности".....	25
2.4. Задачи для самостоятельной работы по теме: "Сила давления жидкости на плоские поверхности".....	49
Глава 3. СИЛА ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА КРИВОЛИНЕЙНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ.....	57
3.1. Основные понятия и теоретические положения.....	57
3.2. Примеры решения задач по теме: "Расчёт силы давления жидкости на криволинейные поверхности".....	61
3.3. Задачи для самостоятельной работы по теме: "Сила давления жидкости на криволинейные поверхности".....	82
Раздел второй. ГИДРОДИНАМИКА.....	89
Глава 4. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ. РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ.....	89
4.1. Основные понятия о параметрах движения жидкости.....	89
4.2. Понятие идеальной жидкости и потока жидкости.....	90
4.3. Гидравлические элементы потока.....	91
4.4. Расход жидкости. Средняя скорость потока. Уравнение неразрывности потока.....	92

4.5. Основное уравнение гидродинамики. Уравнение Даниила Бернулли.....	94
4.5.1. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.....	95
4.5.2. Интерпретация уравнения Бернулли.....	95
4.5.3. Уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной, вязкой жидкости.....	98
4.5.4. Уравнение Бернулли для целого потока реальной, вязкой жидкости.....	100
4.5.5. Экспериментальное определение статического и полного напоров. Расчёт скорости в точке потока.....	102
4.5.6. Диаграмма уравнения Бернулли для потока жидкости в трубе переменного сечения.....	104
4.5.7. Методика составления уравнения Бернулли для решения теоретических и инженерных задач.....	105
4.5.8. Приборы для измерения скорости и расхода, основанные на уравнении Бернулли.....	106
4.6. Режимы движения жидкости.....	111
Глава 5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	113
5.1. Потери напора в гидравлических сопротивлениях.....	113
5.2. Потери напора по длине при ламинарном режиме движения жидкости.....	115
5.3. Потери напора по длине при турбулентном режиме.....	115
5.3.1. Понятие о гидравлически гладких и шероховатых трубах...	116
5.3.2. Потери напора по длине в трубах с описательной шероховатостью.....	119
5.3.3. Потери напора по длине, выраженные через обобщённые параметры.....	120
Раздел третий. ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОМЕХАНИКА.....	123
Глава 6. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ.....	123
6.1. Расчёт простых трубопроводных систем.....	123
6.1.1. Расчёт простой трубопроводной системы с истечением жидкости в атмосферу.....	124
6.1.2. Расчёт простой трубопроводной системы с истечением под уровень.....	127
6.1.3. Методика расчёта простых трубопроводных систем.....	129
6.2. Примеры решения задач по теме: "Расчёт простых трубопроводных систем".....	132
6.3. Задачи для самостоятельной работы по теме: "Расчёт простых трубопроводных систем".....	156
6.4. Расчёт сложных трубопроводных систем.....	166

6.4.1. Системы с последовательным соединением труб.....	168
6.4.2. Системы с параллельным соединением труб.....	170
6.4.3. Распределительные сети, или тупиковые системы.....	173
6.4.4. Системы с путевым расходом жидкости.....	176
6.5. Примеры решения задач по теме: "Расчёт сложных трубопроводных систем".....	177
6.6. Задачи для самостоятельной работы по теме: "Расчёт сложных трубопроводных систем".....	186
Глава 7. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ.....	194
7.1. Истечение жидкости из малого незатопленного и затопленного отверстий в тонкой стенке.....	195
7.2. Истечение жидкости через большое боковое отверстие при постоянном напоре.....	198
7.3. Истечение жидкости из насадков при постоянном напоре.....	199
7.4. Пример решения задачи по теме: "Истечение жидкости из отверстий и насадков".....	201
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	203
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	204
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	205

Учебное издание

Часс Светлана Ивановна

ГИДРОМЕХАНИКА
в примерах и задачах

Учебное пособие

Редактор изд-ва Л. В. Устьянцева

Компьютерная верстка автора

Подписано в печать 10.11.06 г. Бумага офсетная. Формат 60х84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 13,825. Уч.-изд. л. 13,5. Тираж 400 экз. Заказ 50

Изд-во УГТУ

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Отпечатано с оригинал-макета в ООО "ИРА УТК"
620219, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта, 42



Екатеринбург

Аннотация рабочей программы дисциплины (модуля)

«Теория автоматического управления»

Трудоемкость дисциплины (модуля): 3 з.е., 108 часов.

Форма промежуточной аттестации – экзамен

Цель дисциплины (модуля): формирование у студентов прочных знаний об общих принципах построения и законах функционирования автоматических систем управления; об основных методах анализа и синтеза непрерывных линейных систем автоматического управления при детерминированных и случайных внешних воздействиях; об основных методах анализа нелинейных и импульсных систем автоматического управления.

Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины (модуля):

профессиональные

- способен разрабатывать и применять алгоритмы и современные цифровые программные методы расчетов и проектирования отдельных устройств и подсистем мехатронных и робототехнических систем с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматики, измерительной и вычислительной техники в соответствии с техническим заданием, разрабатывать цифровые алгоритмы и программы управления робототехнических систем (ОПК-11).

Результат изучения дисциплины (модуля):

Знать:

- разработку обобщенных вариантов решения проблем, связанных с автоматизацией производств;
- постановку целей проекта, его задач при заданных критериях, целевых функциях, ограничениях;
- разработку проектов по автоматизации технологических процессов;

Уметь:

- участвовать в разработке обобщенных вариантов решения проблем, связанных с автоматизацией производств;
- участвовать в постановке целей проекта, его задач при заданных критериях, целевых функциях, ограничениях;
- участвовать в разработке проектов по автоматизации технологических процессов;

Владеть:

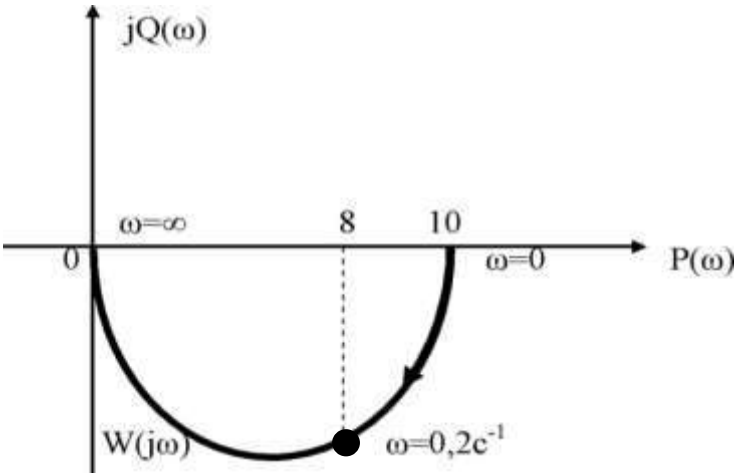
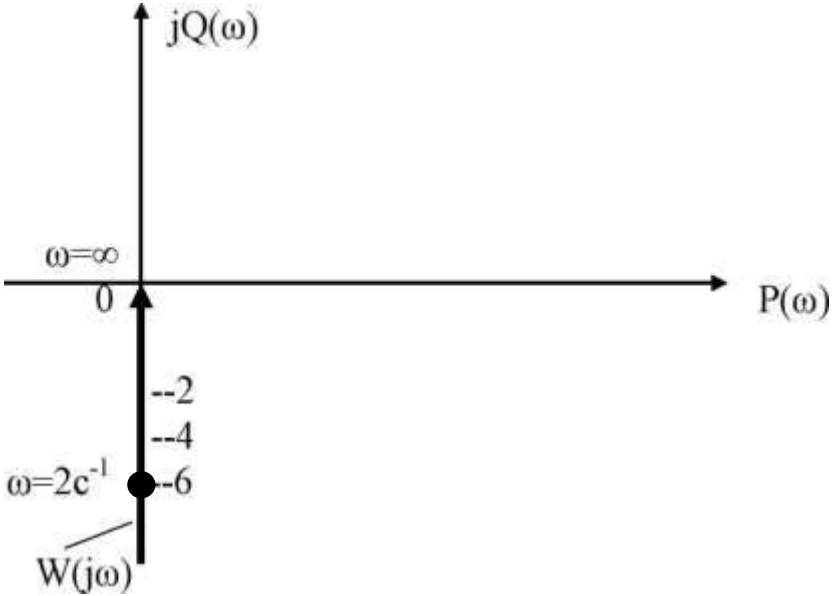
- навыками участия в разработке обобщенных вариантов решения проблем, связанных с автоматизацией производств;
- навыками участия в постановке целей проекта, его задач при заданных критериях, целевых функциях, ограничениях;
- навыками участия в разработке проектов по автоматизации технологических процессов.

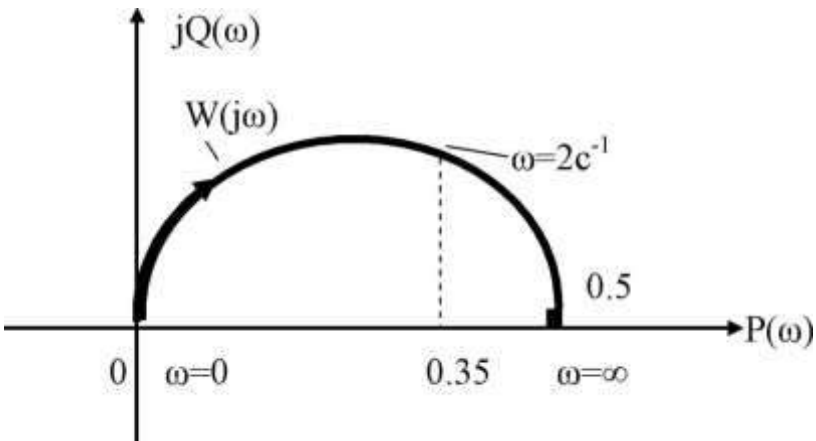
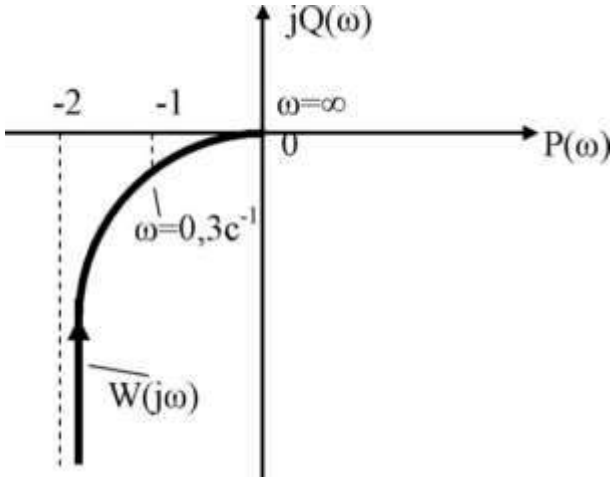
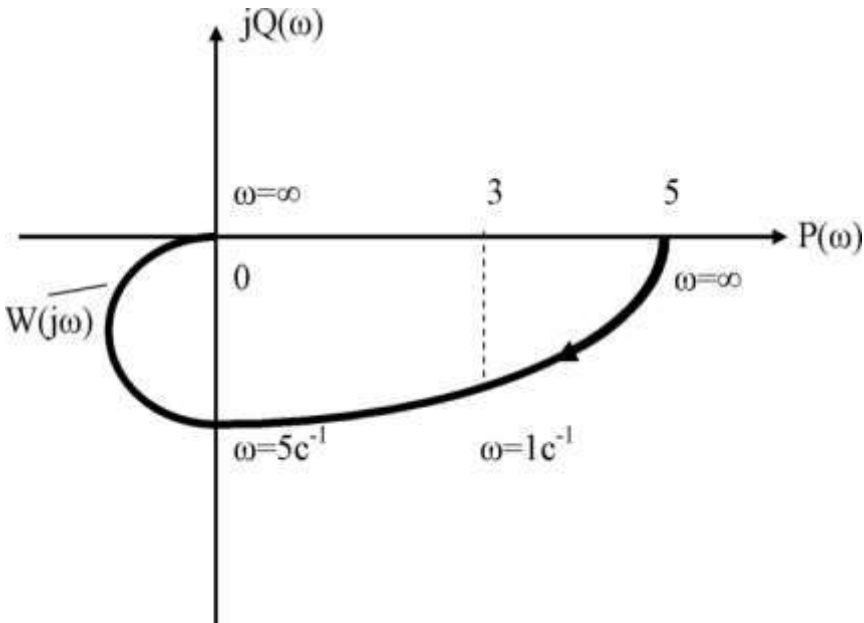
Самостоятельная работа № 1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТИПОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ

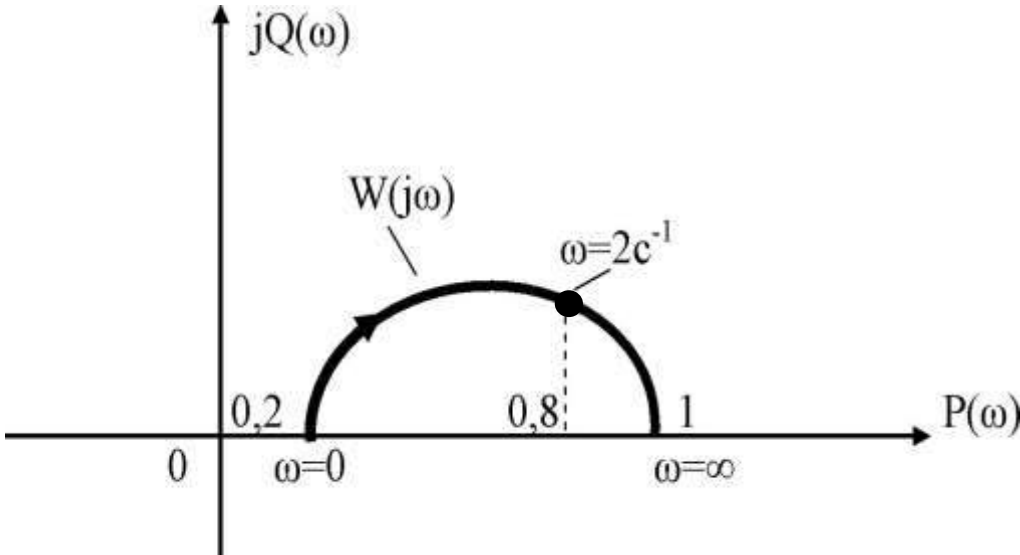
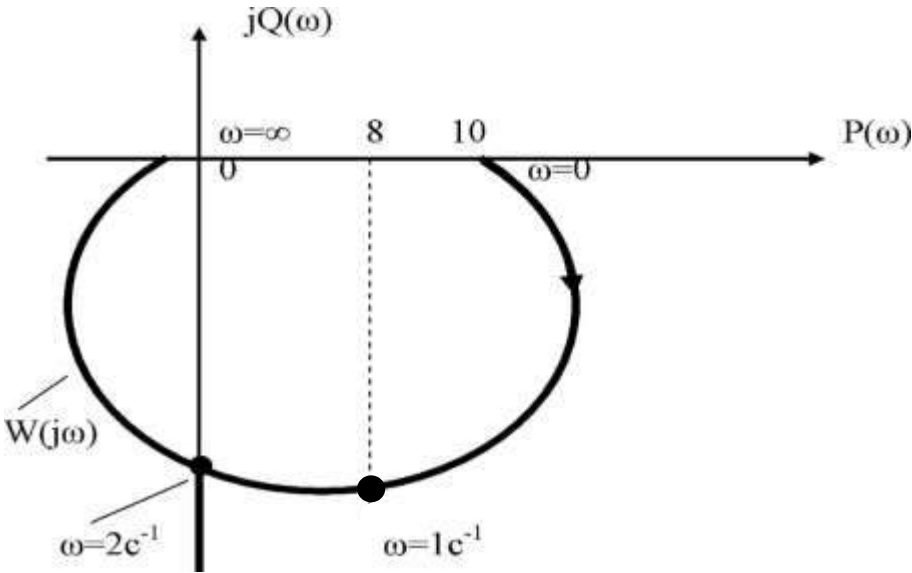
По заданным переходным и частотным характеристикам типовых динамических звеньев (см. табл.1.1) определить типы звеньев, записать их передаточные функции в общем виде и вычислить параметры передаточных функций (передаточные коэффициенты и постоянные времени).

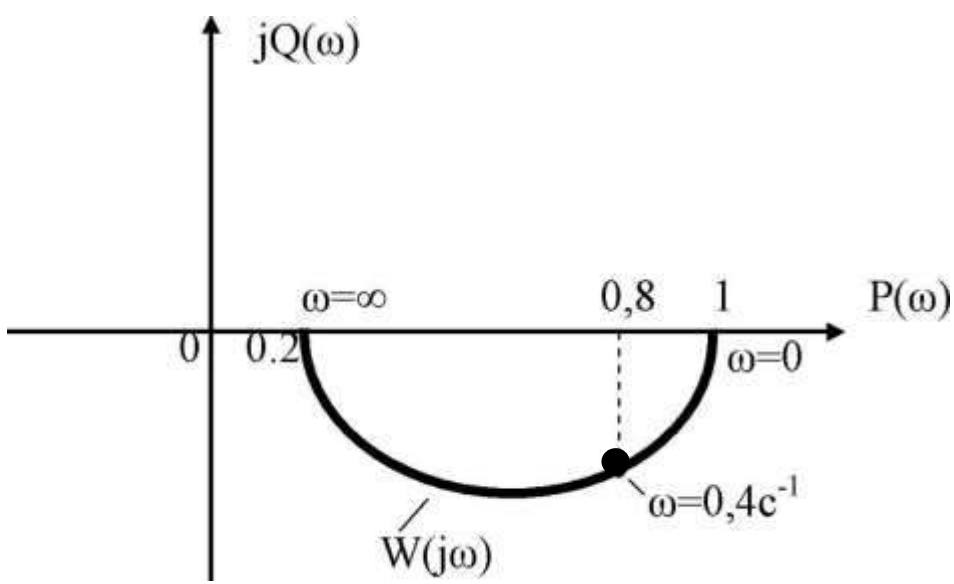
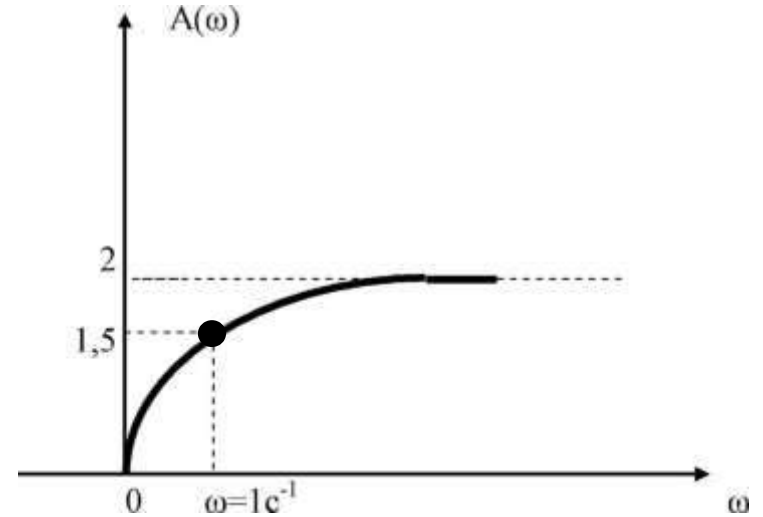
Таблица 1.1

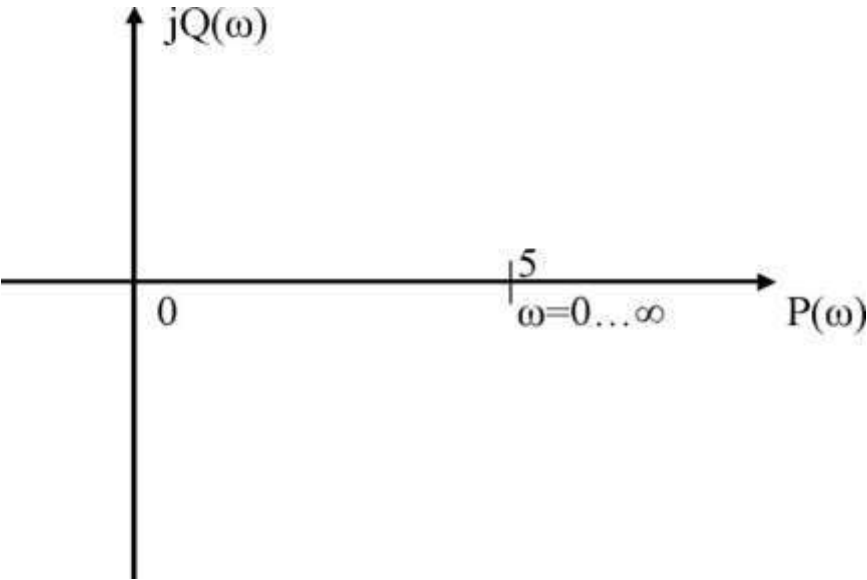
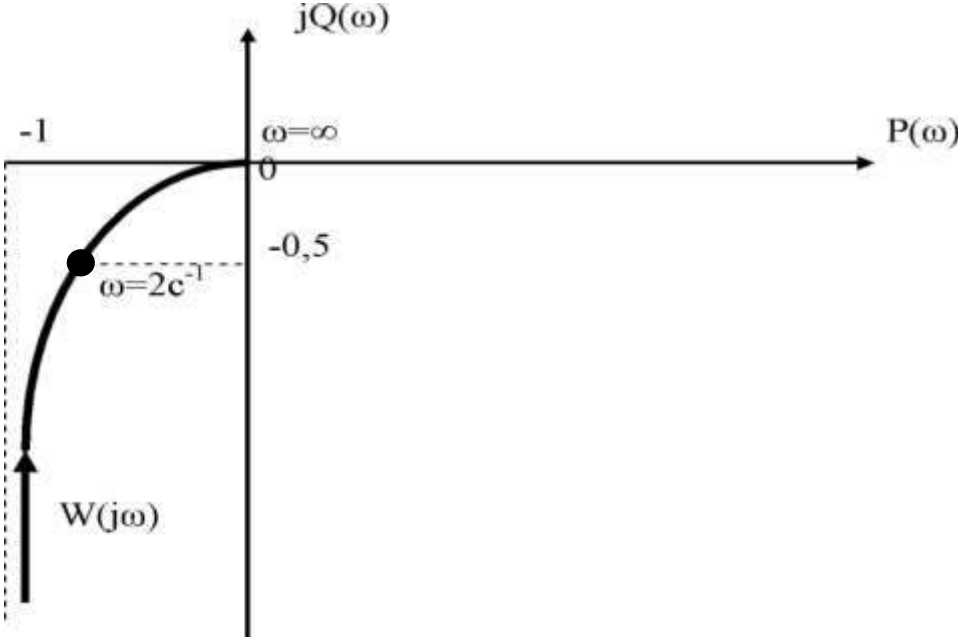
Характеристики динамических звеньев

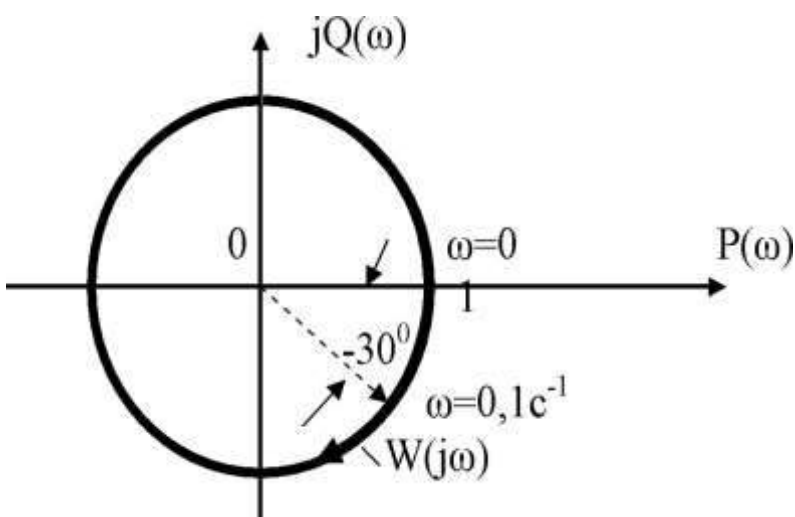
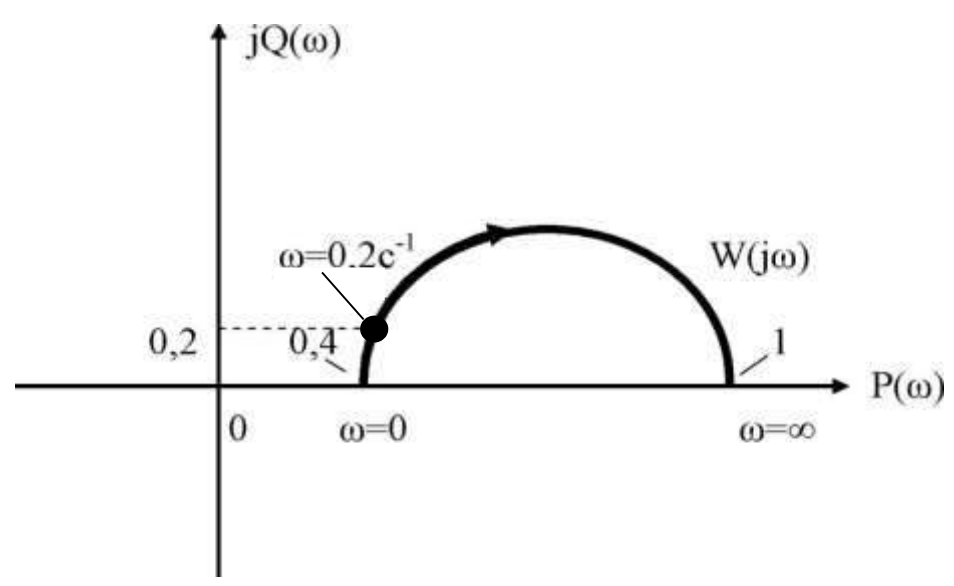
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
1	
2	

Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
3	 A Nyquist plot in the complex plane with the horizontal axis labeled $P(\omega)$ and the vertical axis labeled $jQ(\omega)$. The curve $W(j\omega)$ starts at the origin $(0,0)$ for $\omega=0$, goes into the first quadrant, and ends at $(0.5, 0)$ for $\omega=\infty$. A point on the curve is marked with a dashed vertical line at $P(\omega) = 0.35$, corresponding to $\omega = 2\text{c}^{-1}$. The value 0.5 is marked on the positive $P(\omega)$ axis.
4	 A Nyquist plot in the complex plane with the horizontal axis labeled $P(\omega)$ and the vertical axis labeled $jQ(\omega)$. The curve $W(j\omega)$ starts from a negative $jQ(\omega)$ value for $\omega=0$, goes into the third quadrant, and ends at the origin $(0,0)$ for $\omega=\infty$. A point on the curve is marked with a dashed vertical line at $P(\omega) = -1$, corresponding to $\omega = 0,3\text{c}^{-1}$. The values -2 and -1 are marked on the negative $P(\omega)$ axis.
5	 A Nyquist plot in the complex plane with the horizontal axis labeled $P(\omega)$ and the vertical axis labeled $jQ(\omega)$. The curve $W(j\omega)$ starts at the origin $(0,0)$ for $\omega=0$, goes into the fourth quadrant, crosses the negative $jQ(\omega)$ axis at $\omega = 5\text{c}^{-1}$, and ends at the origin $(0,0)$ for $\omega=\infty$. A point on the curve is marked with a dashed vertical line at $P(\omega) = 3$, corresponding to $\omega = 1\text{c}^{-1}$. The values 3 and 5 are marked on the positive $P(\omega)$ axis.

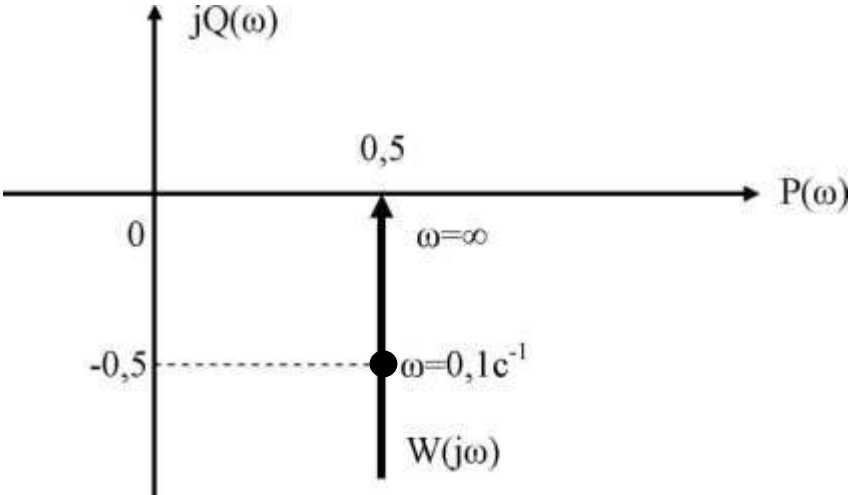
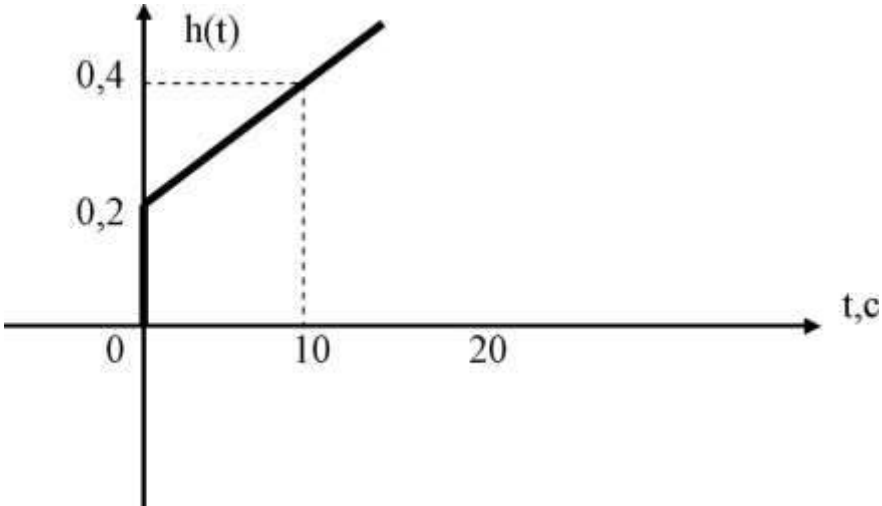
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
6	 A Nyquist plot in the complex plane with the horizontal axis labeled $P(\omega)$ and the vertical axis labeled $jQ(\omega)$. The plot shows a semicircular arc in the upper half-plane starting at $\omega=0$ on the positive real axis at value 0.2 and ending at $\omega=\infty$ on the positive real axis at value 1. A point on the arc is marked with a dot and labeled $\omega=2c^{-1}$, with a dashed vertical line extending to the value 0.8 on the real axis. The arc is labeled $W(j\omega)$ with an arrow indicating the direction of increasing frequency.
7	 A Nyquist plot in the complex plane with the horizontal axis labeled $P(\omega)$ and the vertical axis labeled $jQ(\omega)$. The plot shows a closed curve symmetric about the real axis. The upper half of the curve starts at $\omega=0$ on the positive real axis at value 10, goes up and left, crosses the negative imaginary axis at $\omega=2c^{-1}$, and crosses the negative real axis at $\omega=\infty$. The lower half of the curve starts at $\omega=\infty$ on the negative real axis, goes down and right, crosses the positive imaginary axis at $\omega=1c^{-1}$, and crosses the positive real axis at $\omega=0$. The rightmost point of the curve on the positive real axis is labeled 8. The curve is labeled $W(j\omega)$ with an arrow indicating the direction of increasing frequency.

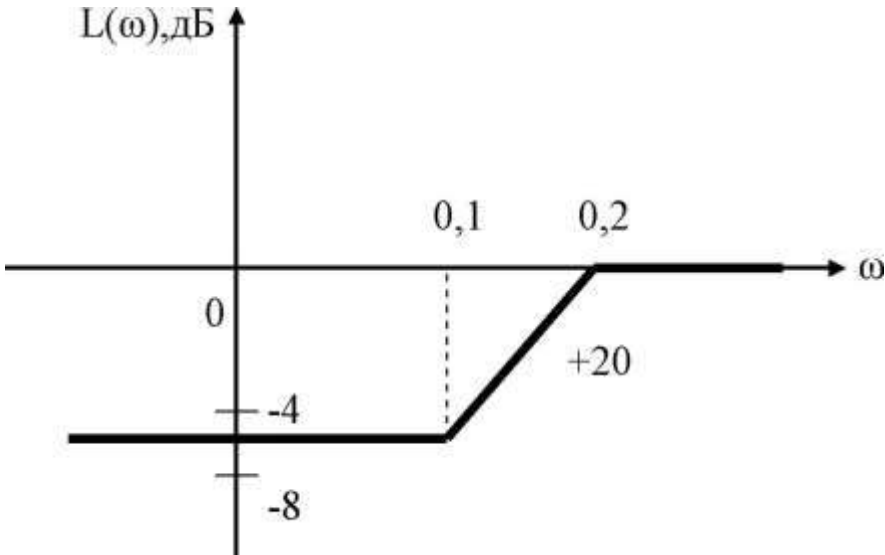
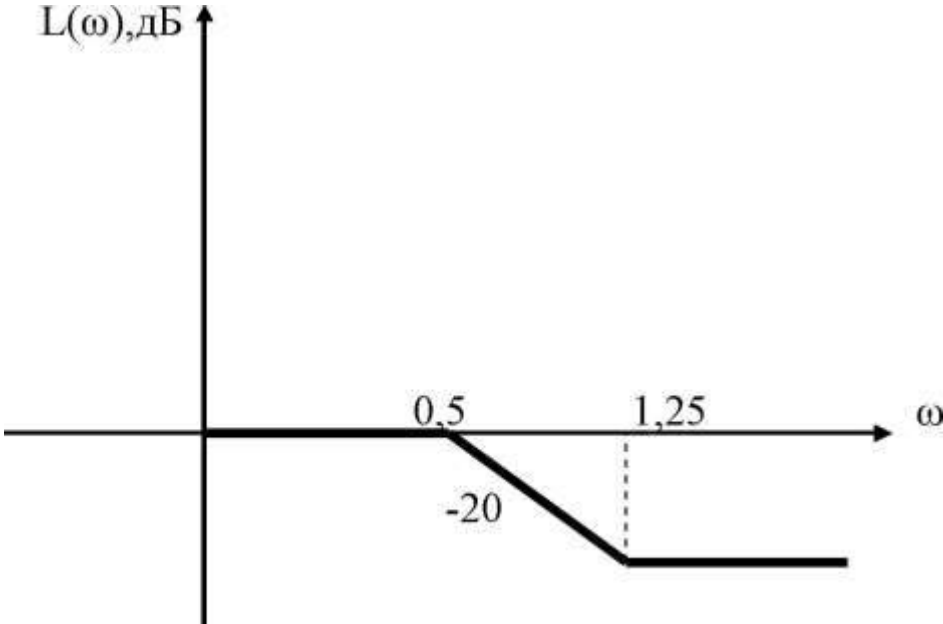
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
8	
9	

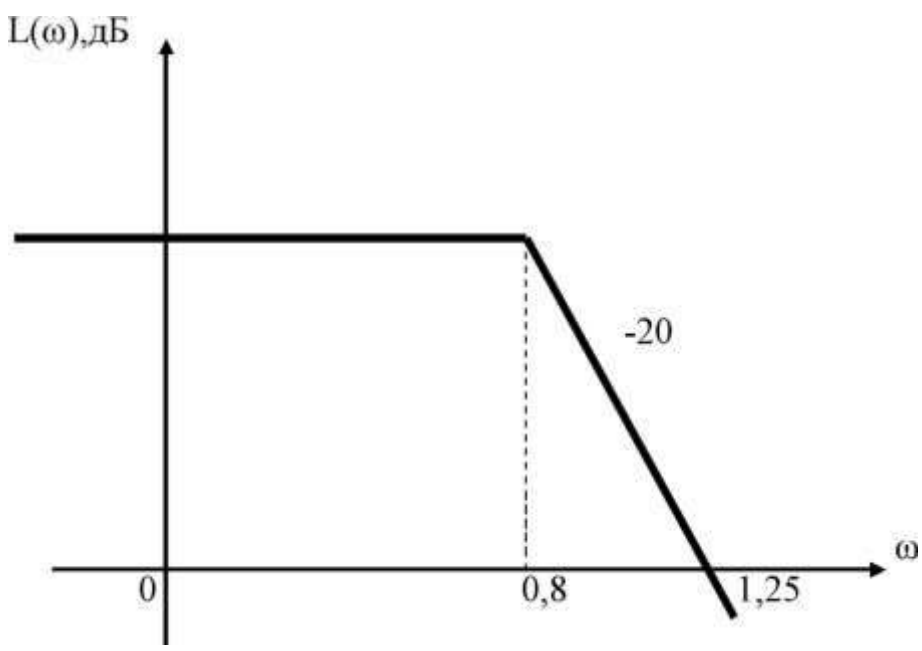
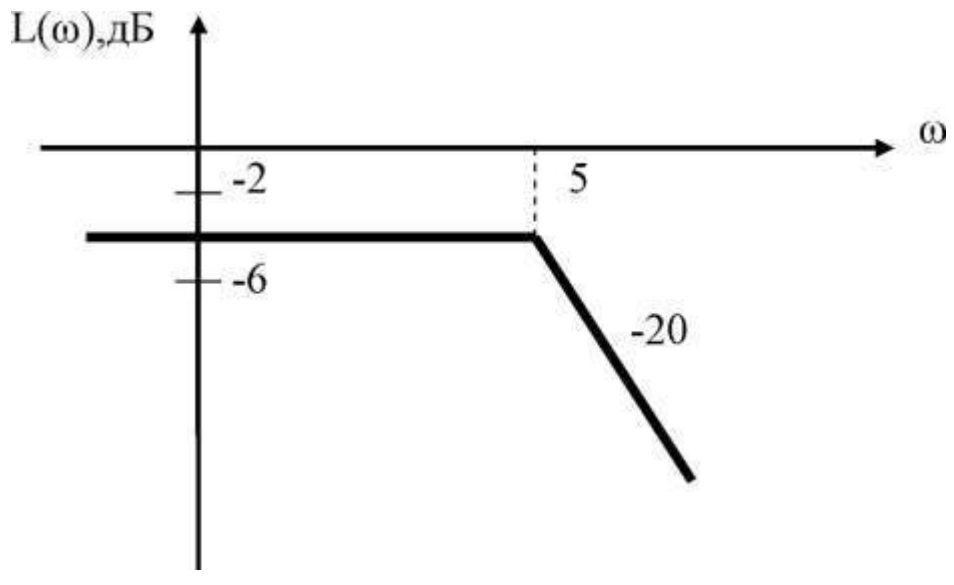
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
10	 A Nyquist plot in the complex plane with a horizontal real axis labeled $P(\omega)$ and a vertical imaginary axis labeled $jQ(\omega)$. The origin is marked with 0. A tick mark on the positive real axis is labeled 5. Below the real axis, the text $\omega=0 \dots \infty$ is written. The plot shows a single point at the origin (0,0).
11	 A Nyquist plot in the complex plane with a horizontal real axis labeled $P(\omega)$ and a vertical imaginary axis labeled $jQ(\omega)$. The origin is marked with 0. A tick mark on the negative real axis is labeled -1. A tick mark on the negative imaginary axis is labeled -0,5. A curve starts from a vertical dashed line at $P = -1$ and approaches the origin from the third quadrant. An arrow on the vertical dashed line points upwards and is labeled $W(j\omega)$. A point on the curve is marked with a solid black dot, and a dashed line from this point to the negative imaginary axis is labeled $\omega=2c^{-1}$. The text $\omega=\infty$ is placed near the origin. The curve is labeled $W(j\omega)$.

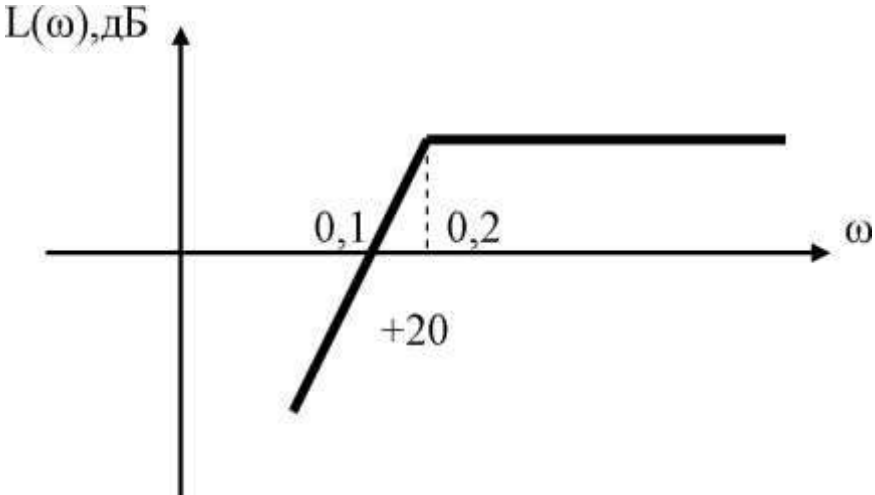
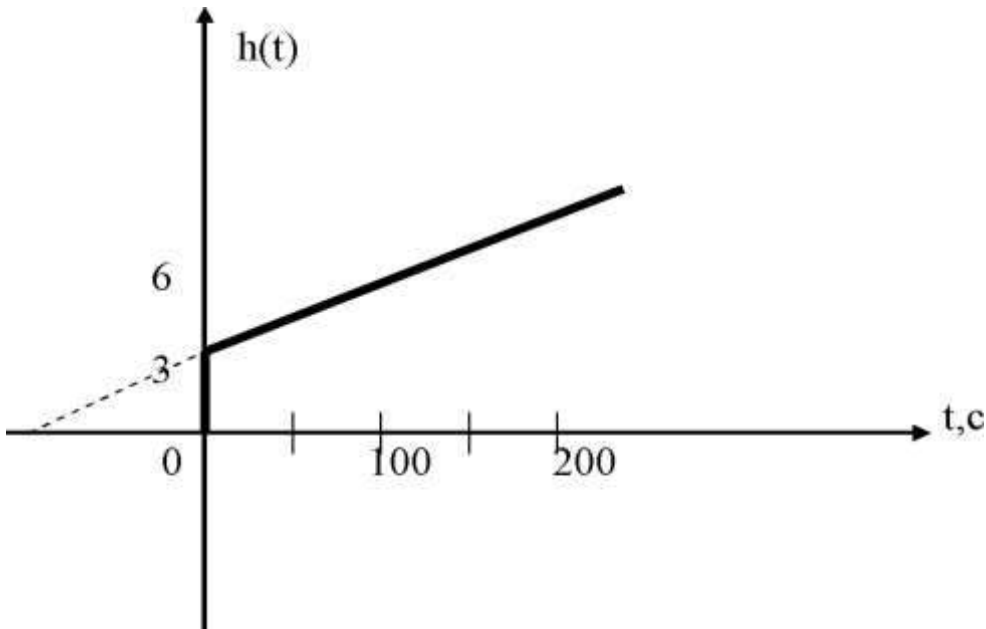
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
12	 A Nyquist plot in the complex plane with the horizontal axis labeled $P(\omega)$ and the vertical axis labeled $jQ(\omega)$. The origin is marked with 0. A unit circle is centered at the origin. The plot shows a curve $W(j\omega)$ starting at $\omega=0$ on the positive $P(\omega)$ axis at the point (1, 0). The curve moves into the fourth quadrant, passing through a point at $\omega=0,1\text{ c}^{-1}$ which is at an angle of -30° from the positive $P(\omega)$ axis. The curve continues to move clockwise, crossing the negative $P(\omega)$ axis and the negative $jQ(\omega)$ axis, eventually approaching the origin from the third quadrant.
13	 A Nyquist plot in the complex plane with the horizontal axis labeled $P(\omega)$ and the vertical axis labeled $jQ(\omega)$. The origin is marked with 0. The plot shows a curve $W(j\omega)$ starting at $\omega=0$ on the positive $P(\omega)$ axis at the point (0,4). The curve moves into the first quadrant, passing through a point at $\omega=0,2\text{ c}^{-1}$ which has coordinates (0,2) on the $P(\omega)$ axis and (0,4) on the $jQ(\omega)$ axis. The curve continues to move clockwise, reaching a maximum $jQ(\omega)$ value and then returning to the positive $P(\omega)$ axis at $\omega=\infty$ at the point (1,0).

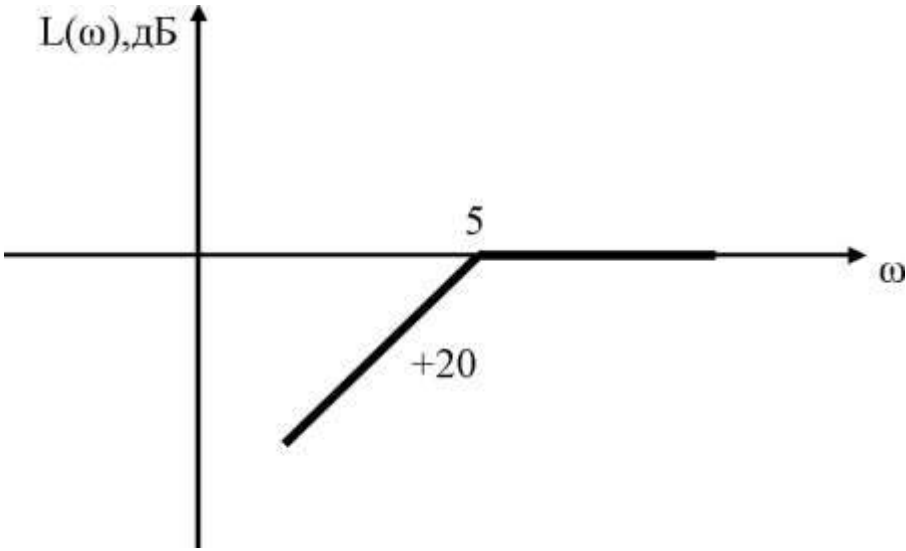
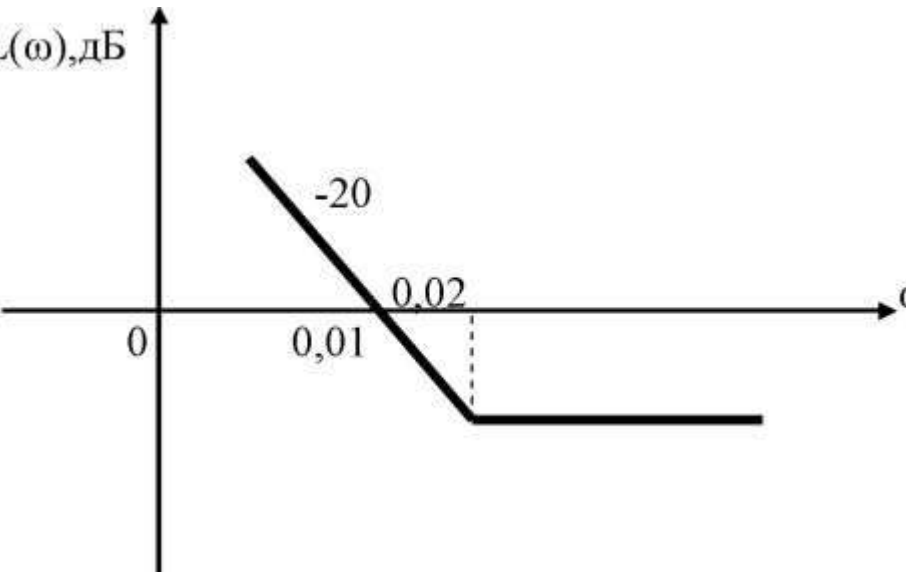
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
14	
15	

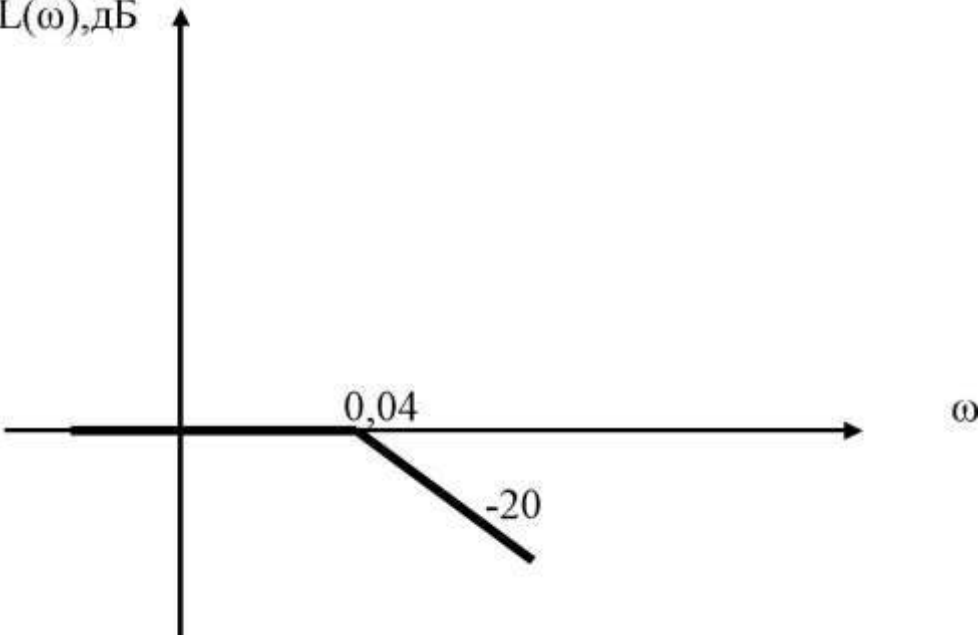
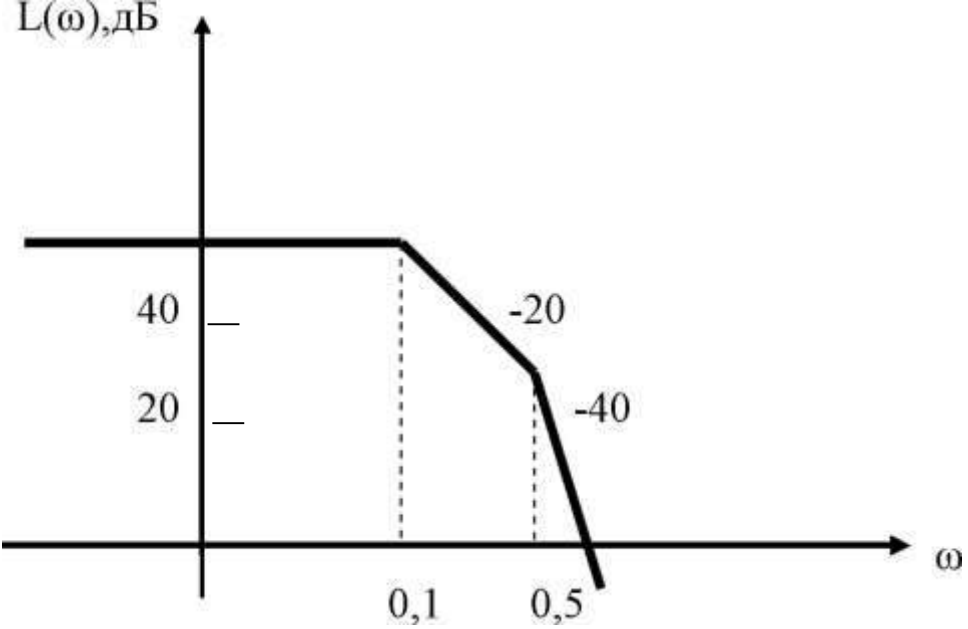
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
16	
17	

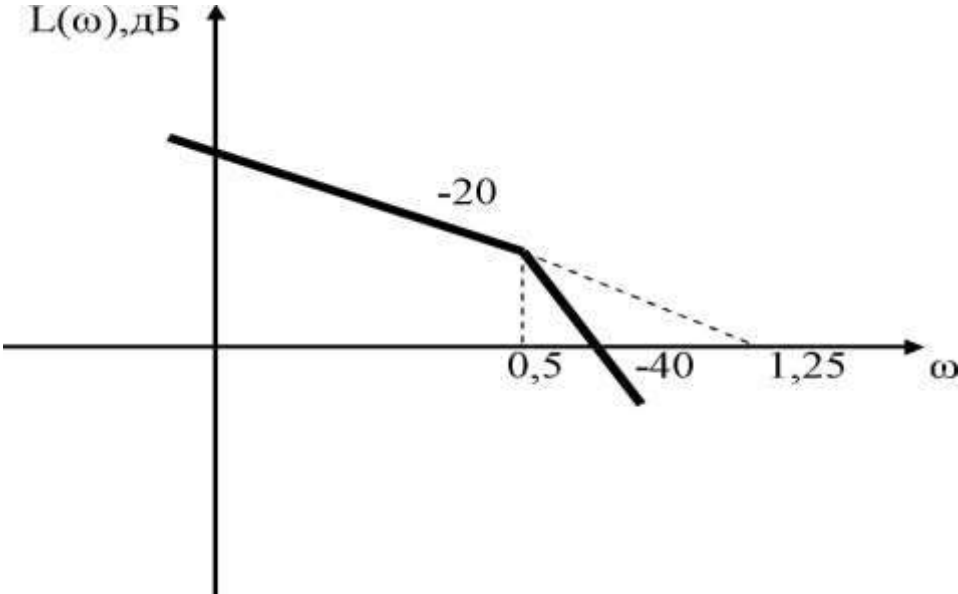
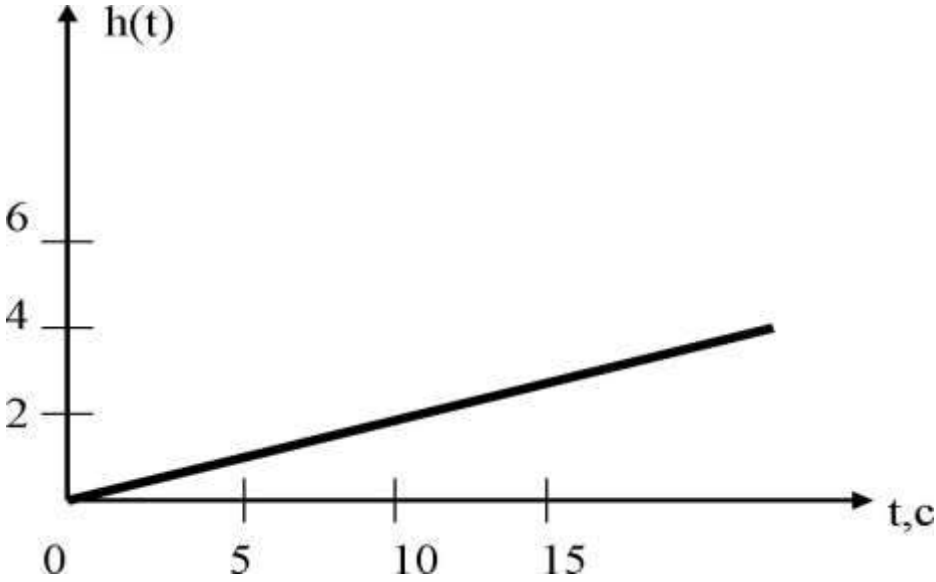
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
18	
19	

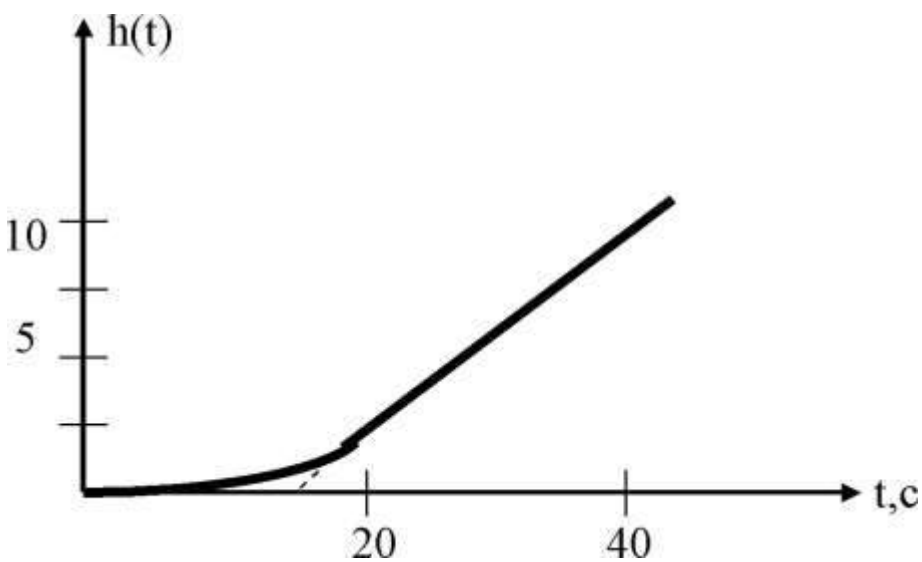
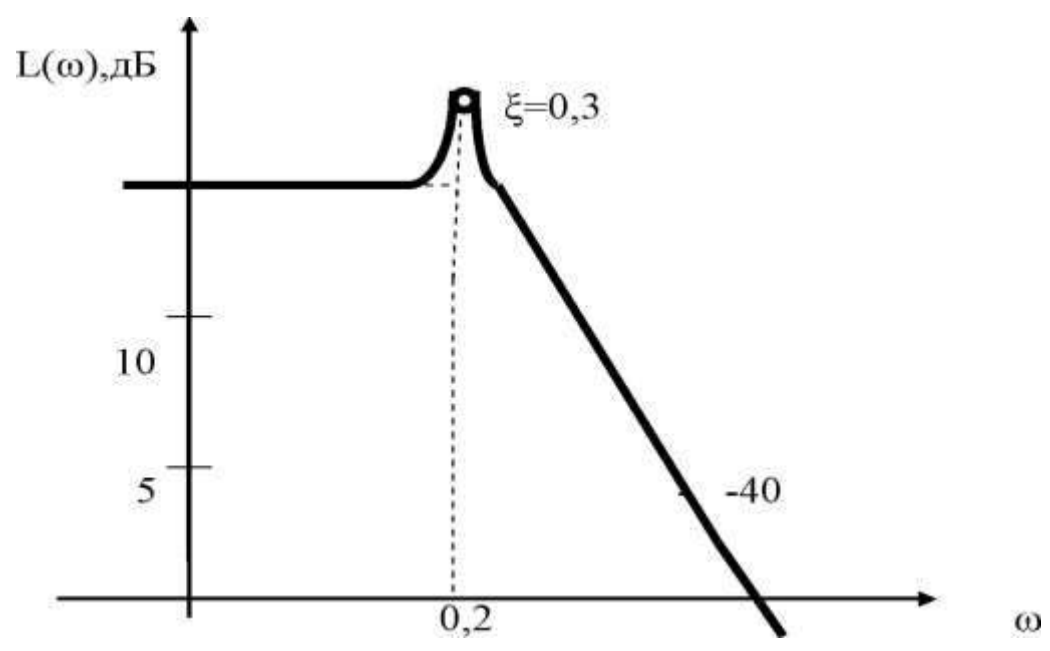
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
20	 A Bode magnitude plot for variant 20. The vertical axis is labeled $L(\omega), \text{дБ}$ and the horizontal axis is labeled ω. The plot consists of a horizontal line at a constant magnitude for $\omega < 0,8$, followed by a downward-sloping line with a slope of -20 dB/decade starting at $\omega = 0,8$. A dashed vertical line marks the corner frequency at $\omega = 0,8$. The horizontal axis has tick marks at 0, $0,8$, and $1,25$.
21	 A Bode magnitude plot for variant 21. The vertical axis is labeled $L(\omega), \text{дБ}$ and the horizontal axis is labeled ω. The plot consists of a horizontal line at a constant magnitude for $\omega < 5$, followed by a downward-sloping line with a slope of -20 dB/decade starting at $\omega = 5$. A dashed vertical line marks the corner frequency at $\omega = 5$. The vertical axis has tick marks at -2 and -6.

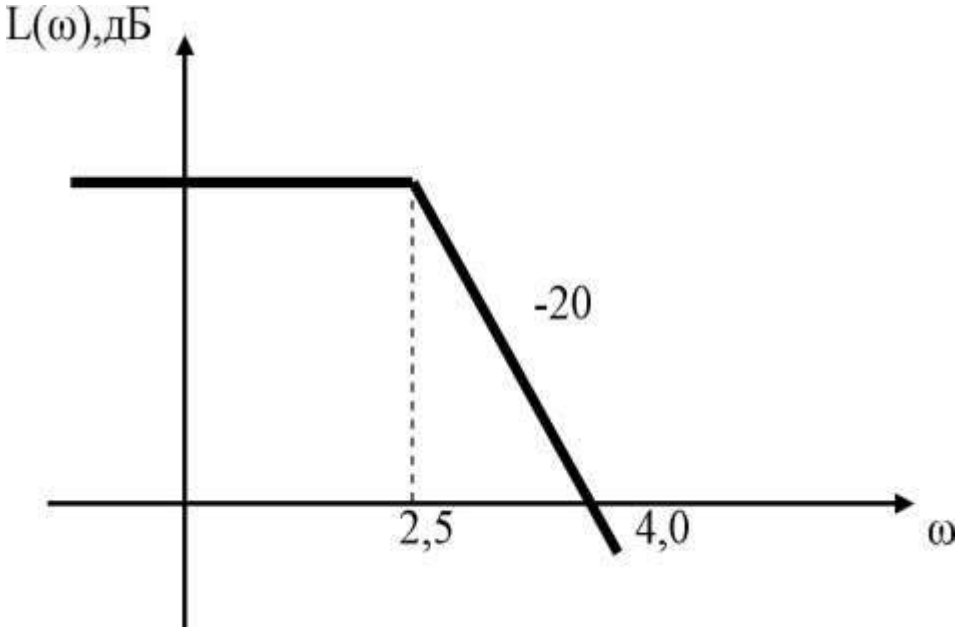
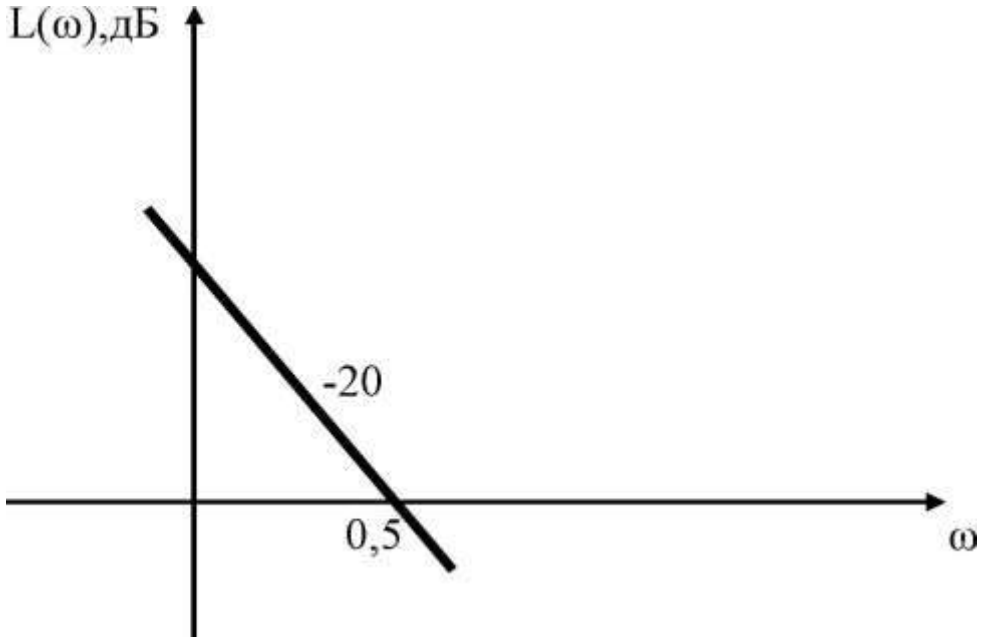
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
22	 A Bode magnitude plot showing the magnitude $L(\omega)$ in dB versus frequency ω. The plot consists of a straight line with a positive slope of +20 dB/decade starting from a low frequency, intersecting the 0 dB line at $\omega = 0.1$, and then becoming horizontal at $\omega = 0.2$. A dashed vertical line marks the corner frequency at $\omega = 0.2$.
23	 A step response plot showing the output $h(t)$ versus time t in seconds. The plot shows a solid line starting at $t = 0$ with a value of 3, and increasing linearly. A dashed line extends the initial slope from the origin to the point $(0, 3)$ on the vertical axis. The horizontal axis has tick marks at 0, 100, and 200 seconds. The vertical axis has tick marks at 3 and 6.

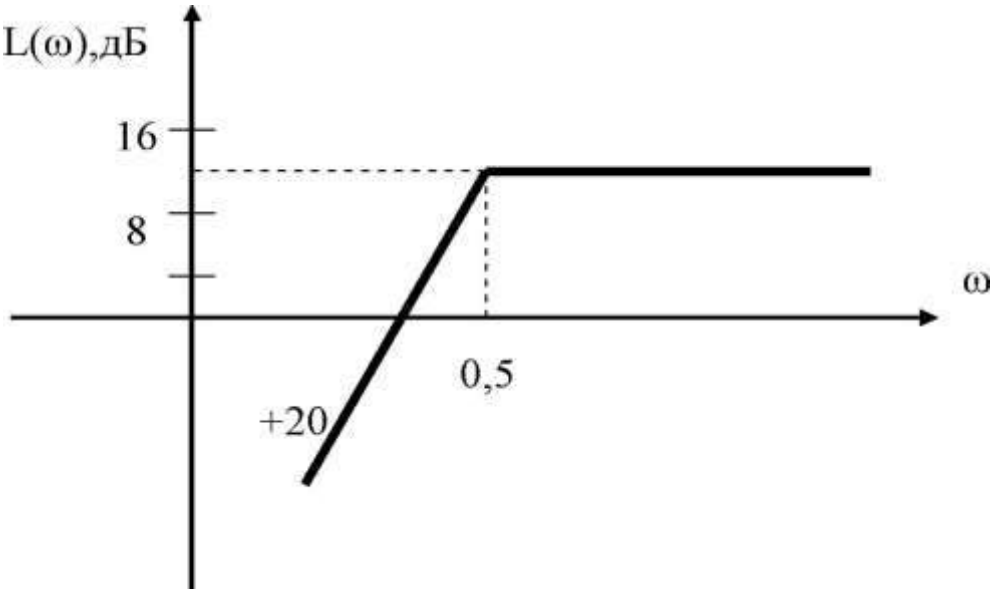
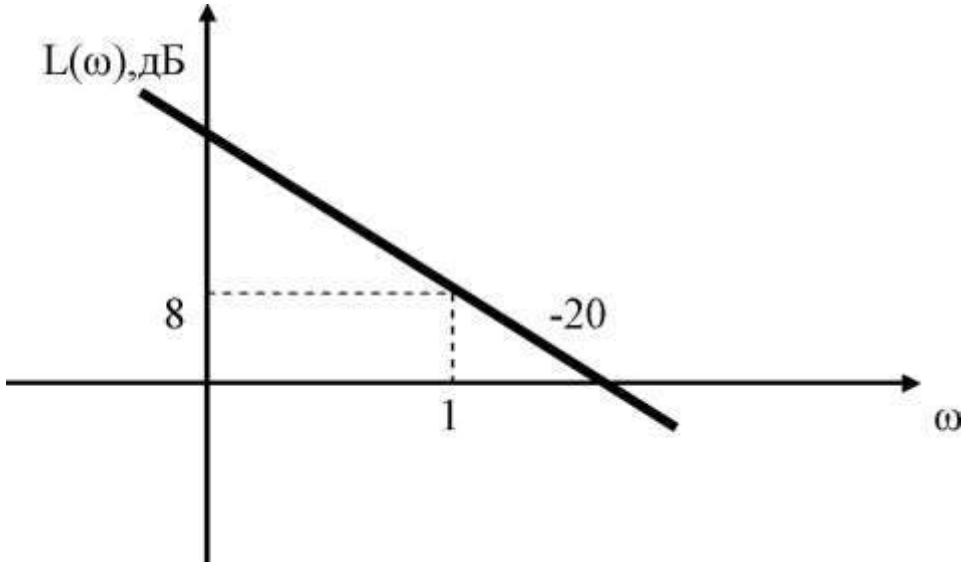
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
24	 A Bode magnitude plot for variant 24. The vertical axis is labeled $L(\omega), \text{дБ}$ and the horizontal axis is labeled ω. The plot consists of two segments: a line with a slope of +20 dB/decade starting from the bottom left, and a horizontal line starting at $\omega = 5$ on the horizontal axis. The corner frequency 5 is marked on the horizontal axis.
25	 A Bode magnitude plot for variant 25. The vertical axis is labeled $L(\omega), \text{дБ}$ and the horizontal axis is labeled ω. The plot consists of two segments: a line with a slope of -20 dB/decade starting from the top left, and a horizontal line starting at $\omega = 0.02$ on the horizontal axis. The corner frequency 0.02 is marked on the horizontal axis. A dashed vertical line connects the corner point to the horizontal axis. The origin is marked with 0, and another point 0.01 is marked on the horizontal axis.

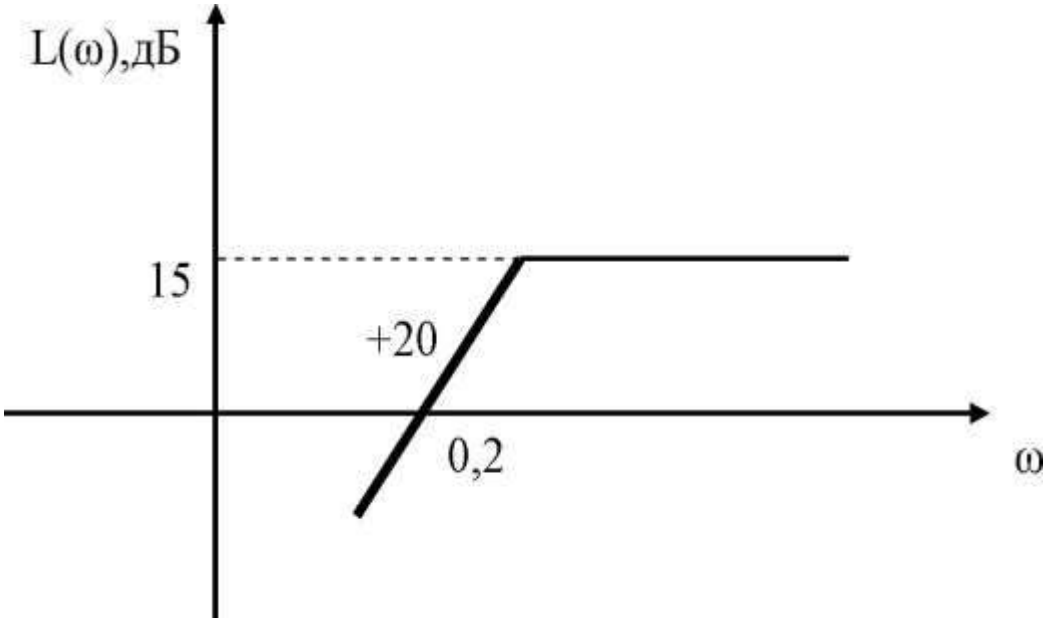
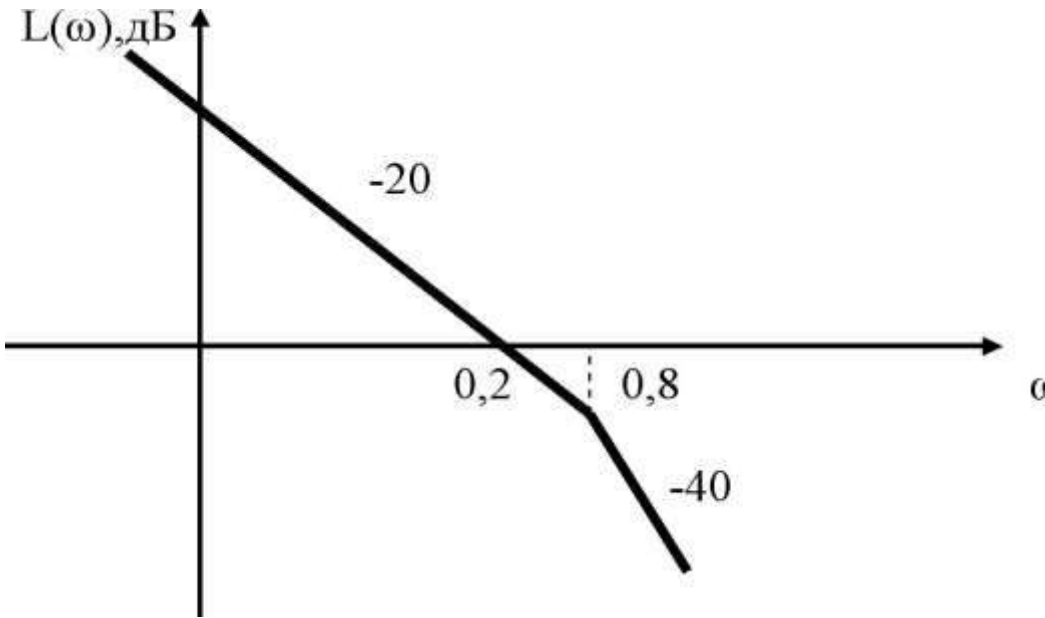
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
26	 A Bode magnitude plot for variant 26. The vertical axis is labeled $L(\omega), \text{дБ}$ and the horizontal axis is labeled ω. The plot consists of a horizontal line at 0 dB for $\omega < 0.04$ and a line with a slope of -20 dB/decade for $\omega > 0.04$. The corner frequency 0.04 is marked on the horizontal axis.
27	 A Bode magnitude plot for variant 27. The vertical axis is labeled $L(\omega), \text{дБ}$ and the horizontal axis is labeled ω. The plot consists of three segments: a horizontal line at 40 dB for $\omega < 0.1$, a line with a slope of -20 dB/decade for $0.1 < \omega < 0.5$, and a line with a slope of -40 dB/decade for $\omega > 0.5$. The corner frequencies 0.1 and 0.5 are marked on the horizontal axis. The vertical axis has tick marks at 20 and 40 dB.

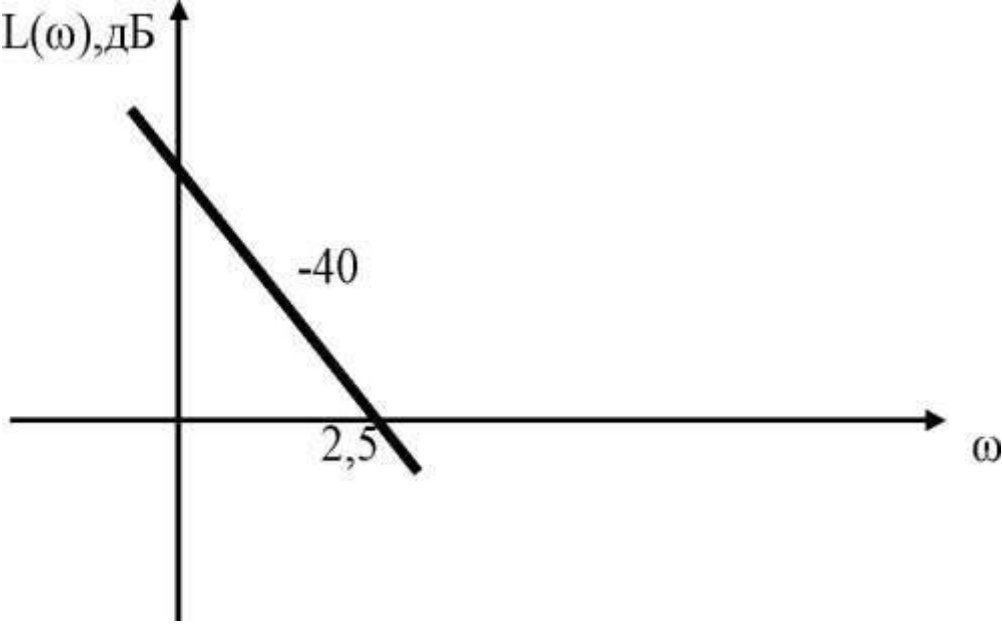
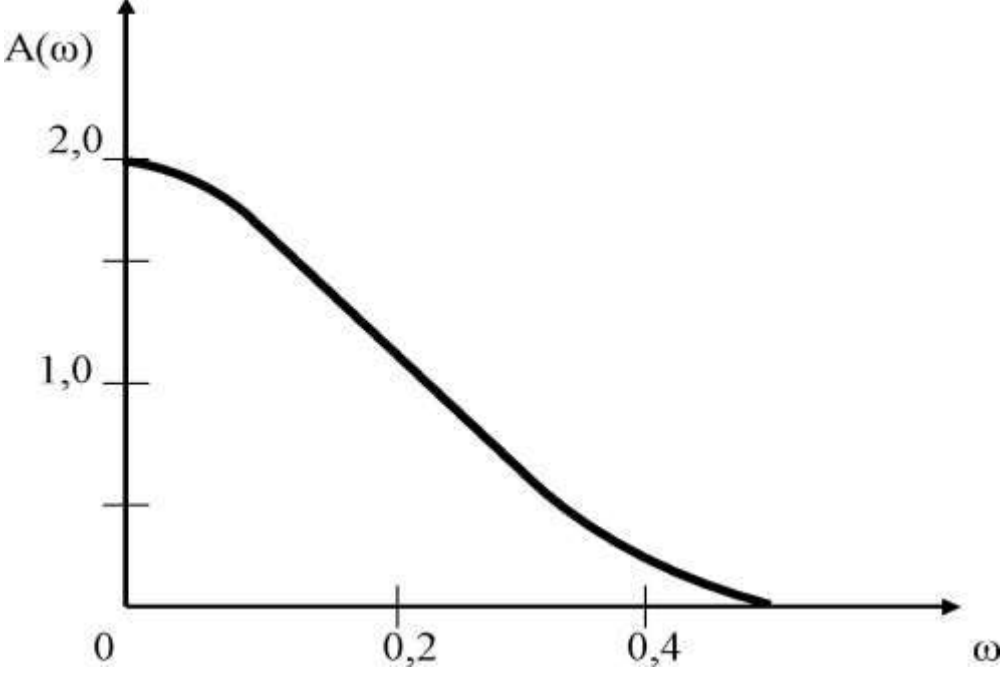
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
28	 The figure shows a Bode magnitude plot with the vertical axis labeled $L(\omega), \text{дБ}$ and the horizontal axis labeled ω. The plot consists of two solid line segments. The first segment starts at a high value on the y-axis and decreases with a slope of -20 dB/decade. A dashed line extension of this segment passes through the point $(0.5, 0)$ on the horizontal axis. The second segment starts at $\omega = 0.5$ and decreases with a steeper slope of -40 dB/decade, passing through the point $(1.25, 0)$ on the horizontal axis.
29	 The figure shows a step response plot with the vertical axis labeled $h(t)$ and the horizontal axis labeled $t, \text{с}$. The vertical axis has tick marks at 2, 4, and 6. The horizontal axis has tick marks at 0, 5, 10, and 15. The plot is a straight line starting from the origin $(0, 0)$ and increasing linearly. At $t = 15$ seconds, the value of $h(t)$ is approximately 3.5.

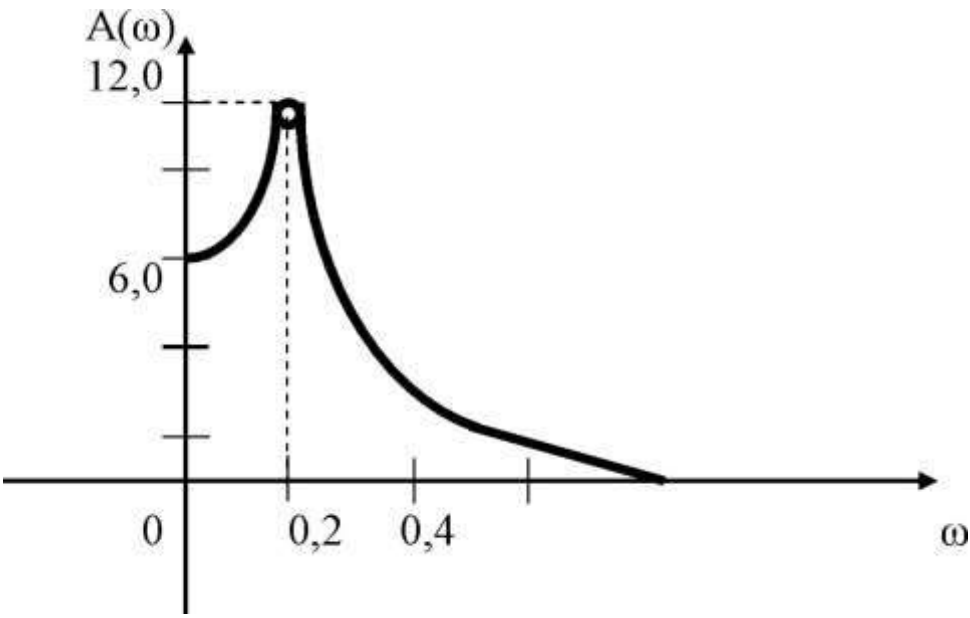
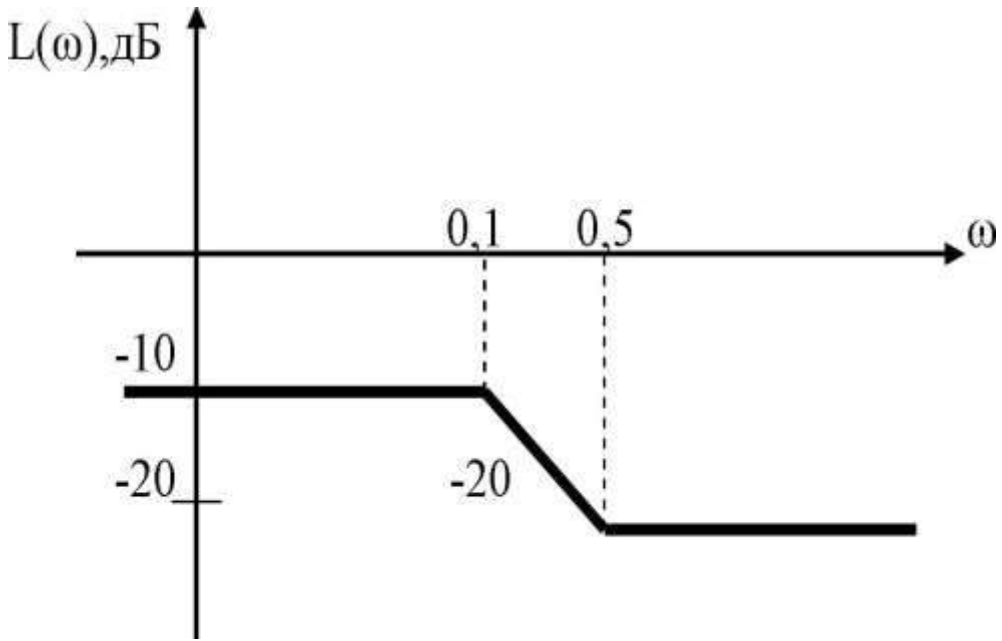
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
30	 The graph shows the step response $h(t)$ of a system. The vertical axis is labeled $h(t)$ and has tick marks at 5 and 10. The horizontal axis is labeled t, c and has tick marks at 20 and 40. The curve starts at the origin (0,0) and rises smoothly, passing through approximately (20, 5) and (40, 10). A dashed tangent line is drawn at the point (20, 5), indicating the asymptotic behavior of the response.
31	 The graph shows the Bode magnitude plot $L(\omega), dB$ versus frequency ω. The vertical axis is labeled $L(\omega), dB$ and has tick marks at 5 and 10. The horizontal axis is labeled ω and has a tick mark at 0,2. The plot consists of a horizontal line at low frequencies, a resonance peak at $\omega = 0,2$ with a damping ratio $\xi = 0,3$, and a line with a slope of -40 dB/decade at high frequencies. A dashed vertical line connects the peak to the frequency axis at 0,2.

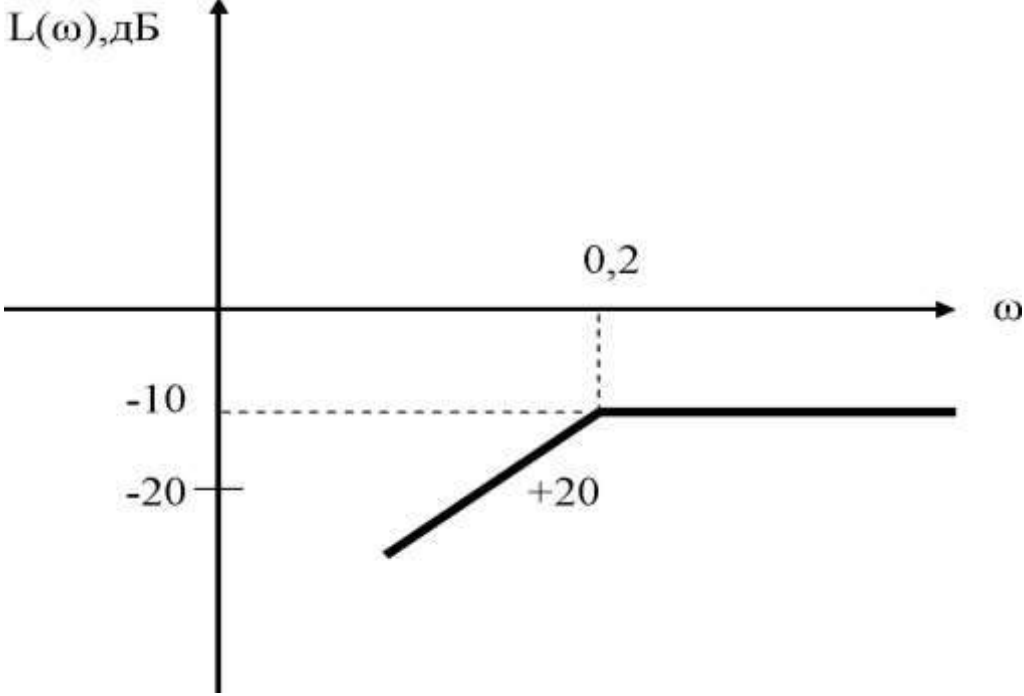
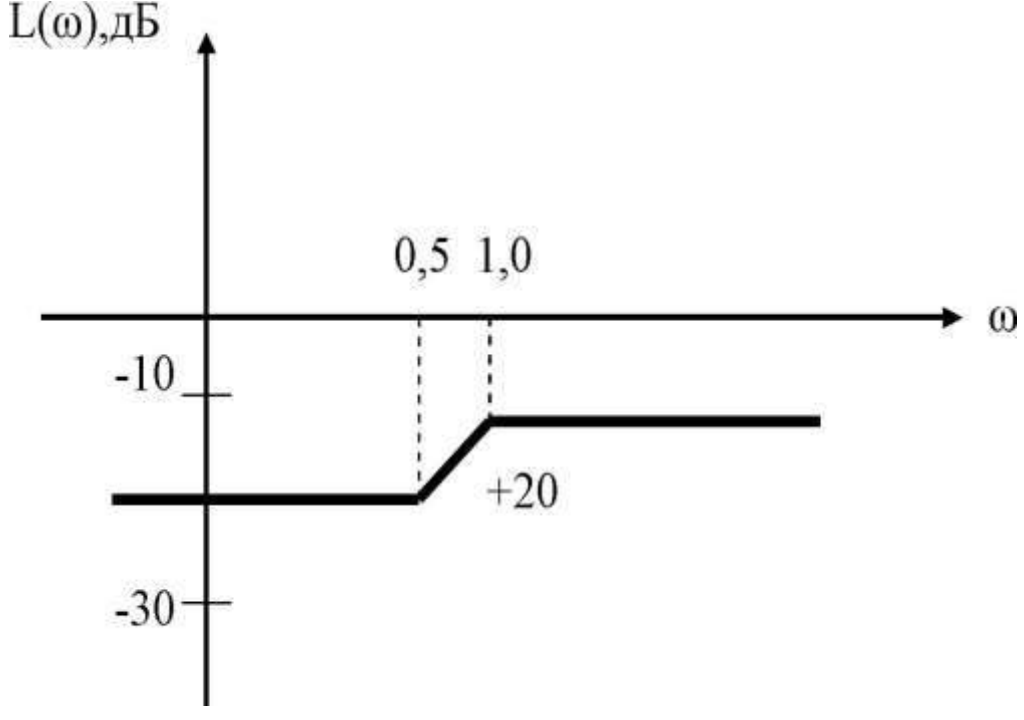
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
32	 The plot shows a horizontal line at high frequencies and a line with a slope of -20 dB/decade starting at $\omega = 2,5$. The line crosses the 0 dB axis at $\omega = 4,0$.
33	 The plot shows a line with a slope of -20 dB/decade that crosses the 0 dB axis at $\omega = 0,5$.

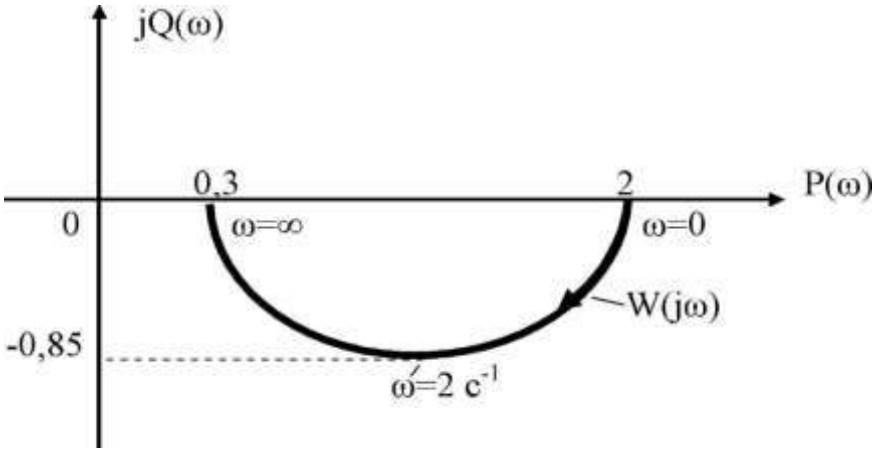
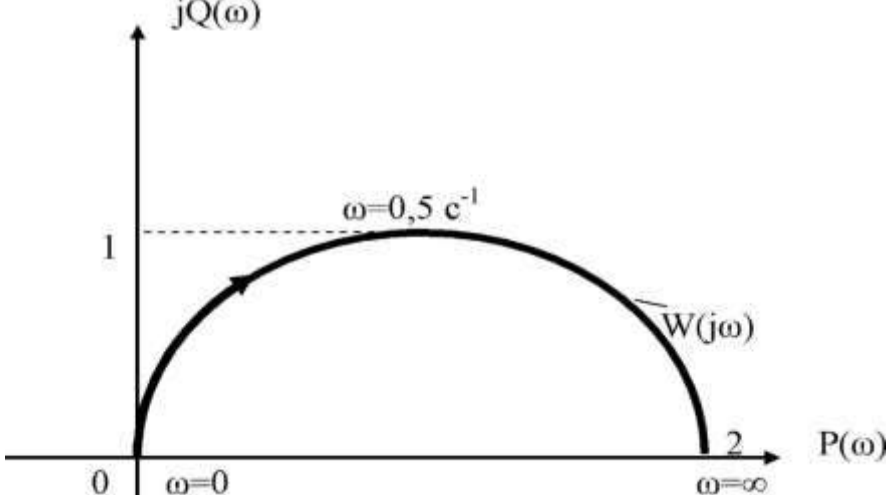
Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
34	 Graph showing the magnitude $L(\omega)$ in dB versus frequency ω. The plot consists of a line with a slope of $+20$ dB/decade starting from a low frequency, reaching a magnitude of 16 dB at $\omega = 0.5$, and then continuing as a horizontal line.
35	 Graph showing the magnitude $L(\omega)$ in dB versus frequency ω. The plot is a straight line with a slope of -20 dB/decade. At $\omega = 1$, the magnitude is 8 dB.

Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
36	
37	

Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
38	 A Bode magnitude plot showing the magnitude $L(\omega)$ in dB on the vertical axis versus frequency ω on the horizontal axis. The plot is a straight line with a negative slope. The slope is indicated by the label -40. The line intersects the horizontal axis at a frequency value of $2,5$.
39	 A Bode magnitude plot showing the magnitude $A(\omega)$ on the vertical axis versus frequency ω on the horizontal axis. The vertical axis has tick marks at 0, $1,0$, and $2,0$. The horizontal axis has tick marks at 0, $0,2$, and $0,4$. The plot is a smooth, decreasing curve that starts at a magnitude of $2,0$ at $\omega = 0$ and approaches zero as frequency increases.

Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
40	 The graph shows the magnitude characteristic $A(\omega)$ as a function of frequency ω. The vertical axis is labeled $A(\omega)$ and has tick marks at 6,0 and 12,0. The horizontal axis is labeled ω and has tick marks at 0, 0,2, and 0,4. The curve starts at $A(0) = 6,0$, rises to a peak of 12,0 at $\omega = 0,2$, and then decays towards zero as ω increases.
41	 The graph shows the magnitude characteristic $L(\omega)$ in dB as a function of frequency ω. The vertical axis is labeled $L(\omega), \text{дБ}$ and has tick marks at -10 and -20. The horizontal axis is labeled ω and has tick marks at 0,1 and 0,5. The plot is piecewise linear, starting at -10 dB, dropping to -20 dB at $\omega = 0,1$, and dropping further to -30 dB at $\omega = 0,5$.

Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
42	 The Bode magnitude plot for variant 42 shows the magnitude $L(\omega)$ in dB on the vertical axis and frequency ω on the horizontal axis. The vertical axis has tick marks at -10 and -20 dB. The horizontal axis has a tick mark at 0,2. The plot consists of a horizontal line at 0 dB for low frequencies, a line with a slope of +20 dB/decade starting at $\omega = 0,2$ and reaching -10 dB, and a horizontal line at -10 dB for higher frequencies. Dashed lines indicate the corner frequency at 0,2 and the magnitude level at -10 dB.
43	 The Bode magnitude plot for variant 43 shows the magnitude $L(\omega)$ in dB on the vertical axis and frequency ω on the horizontal axis. The vertical axis has tick marks at -10 and -30 dB. The horizontal axis has tick marks at 0,5 and 1,0. The plot consists of a horizontal line at -30 dB for low frequencies, a line with a slope of +20 dB/decade starting at $\omega = 0,5$ and reaching -10 dB at $\omega = 1,0$, and a horizontal line at -10 dB for higher frequencies. Dashed lines indicate the corner frequencies at 0,5 and 1,0, and the magnitude level at -10 dB.

Номер варианта	Частотная (переходная) характеристика звена
44	
45	

Примечания:

1. Звенья в вариантах № 9, 15, 18 - 22, 24 - 28, 31, 32, 34, 36, 37, 39 - 43 являются минимально-фазовыми.
2. Звено в варианте № 39 описывается дифференциальным уравнением первого порядка.
3. Звенья в вариантах № 31, 40 описываются дифференциальным уравнением второго порядка.

Самостоятельная работа № 2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ СХЕМ

В соответствии с заданным вариантом (см. табл. 2.1) необходимо преобразовать исходную многоконтурную систему в одноконтурную с целью получения передаточных функций разомкнутого контура системы $W_{\text{рк}}(p)$ и замкнутой системы $\Phi_i(p)$ по заданным каналам воздействий. Преобразование алгоритмической схемы следует осуществлять последовательно, записывая передаточные функции эквивалентных соединений. Преобразование схемы проводят аргументировано, поясняя все действия, например, «перенесём узел разветвления сигналов 1 через звено $W_i(p)$ вперёд» или «перенесём сумматор 2 в сумматор 1 через звено $W_i(p)$ » и т.д. (см. табл. П. 1).

Передаточные функции разомкнутой и замкнутой систем следует записать через **эквивалентные** передаточные функции звеньев, не раскрывая последние.

Таблица 2.1

Алгоритмические схемы многоконтурных систем

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздействий
1		$X_3 - X$ $Z - X$
2		$X_3 - X$ $Z - X$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейств ий
3		$X_3 - X_1$ $Z - X$
4		$X_3 - X_1$ $Z - X_1$
5		$X_3 - X$ $Z - X$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейств ий
6		$X_3 - X$ $Z - X$
7		$X_3 - X$ $Z - \epsilon$
8		$X_3 - X$ $Z - X$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейст вий
9		$X_3 - X$ $Z - X$
10		$X_3 - X$ $Z - X$
11		$X_3 - X$ $Z - X$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейс твий
12		$X_3 - X_1$ $Z - X_2$
13		$X_3 - X_1$ $Z_1 - X_1$
14		$X_3 - X_1$ $Z - X_1$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейс твий
15		$X_3 - X$ $Z_1 - X$
16		$X_3 - X$ $Z - X$
17		$X_3 - X_1$ $Z - X_2$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейс твий
18		$X_3 - X$ $Z - X$
19		$X_3 - X$ $Z - X$
20		$X_3 - X$ $Z_1 - X$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейс твий
21		$X_3 - X_1$ $Z - X_1$
22		$X_3 - X_1$ $Z - X_1$
23		$X_3 - X_1$ $Z - X_1$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейс твий
24		$X_3 - X_2$ $Z - X_1$
25		$X_3 - X_1$ $Z - X_1$
26		$X_3 - X_1$ $Z - X_2$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейс твий
27		$X_3 - X_1$ $Z - X$
28		$X_3 - \varepsilon$ $Z - X$
29		$X_3 - \varepsilon$ $Z - X$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейс твий
30		$X_3 - \varepsilon$ $Z - X$
31		$X_3 - X$ $Z - X$
32		$X_3 - X$ $Z - X$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейс твий
33		$X_3 - X$ $Z - X$
34		$X_3 - X$ $Z - \varepsilon$
35		$X_3 - X$ $Z - X$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейс твий
36	Block diagram for variant 36. Input X_3 enters a summing junction with negative feedback from X. The output is labeled ϵ. This signal passes through block W_{28} to a second summing junction. The second summing junction also receives negative feedback from X and a signal from block W_6. The output of the second summing junction goes through block W_{10} to a third summing junction. The third summing junction also receives negative feedback from X and a signal from block W_9. The output of the third summing junction goes through block W_{18} to a fourth summing junction. The fourth summing junction also receives negative feedback from X and a signal from block W_{41}. The output of the fourth summing junction is X. A signal Z is shown entering block W_6.	$X_3 - \epsilon$ $Z - X$
37	Block diagram for variant 37. Input X_3 enters a summing junction with negative feedback from X. The output goes through block W_1 to a summing junction. This summing junction also receives negative feedback from X and a signal from block W_{17}. The output goes through block W_{11} to a summing junction. This summing junction also receives negative feedback from X and a signal from block W_{40}. The output goes through block W_{42} to a summing junction. This summing junction also receives negative feedback from X and a signal from block W_2. The output of this summing junction is X. A signal Z is shown entering block W_{40}.	$X_3 - X$ $Z - X$
38	Block diagram for variant 38. Input X_3 enters a summing junction with negative feedback from X. The output goes through block W_4 to a summing junction. This summing junction also receives negative feedback from X and a signal from block W_{10}. The output goes through block W_{26} to a summing junction. This summing junction also receives negative feedback from X and a signal from block W_{25}. The output goes through block W_{28} to a summing junction. This summing junction also receives negative feedback from X and a signal from block W_{18}. The output of this summing junction is X. A signal Z is shown entering block W_{26}.	$X_3 - X$ $Z - X$

Номер варианта	Алгоритмическая схема	Каналы воздейс твий
39		$X_3 - X$ $Z - X$
40		$X_3 - X$ $Z - X$

Самостоятельная работа № 3.
ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
РАЗОМКНУТЫХ СИСТЕМ

По заданной передаточной функции разомкнутого контура системы $W(p)$ (см.табл. 3.1) построить логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) $L(\omega)$ и фазо-частотную характеристику $\varphi(\omega)$.

Таблица 3.1

Исходные данные для построения характеристик

Номер варианта	Передаточная функция $W(p)$
1	$W(p) = \frac{10(p+1)}{(5p+1)(0,5p+1)(12p+1)p}$
2	$W(p) = \frac{5(p+2)}{(0,3p+1)(0,8p+1)(4p+1)(0,15p+1)}$
3	$W(p) = \frac{0,3(p+0,5)}{(10p+1)(0,3p+1)^2(15p+1)p}$
4	$W(p) = \frac{0,1(2p+1)}{p^2(0,4p+1)(11p+1)}$
5	$W(p) = \frac{(p+2)(p+1,25)}{(14p+1)(10p+1)(0,2p+1)}$
6	$W(p) = \frac{10(0,5p+1)}{p(p+1)^2(0,2p+1)^2}$
7	$W(p) = \frac{40(50p+1)}{p(2p+1)^2(100p+1)}$
8	$W(p) = \frac{100(0,02p+1)^2}{(0,5p+1)^2(0,01p+1)}$
9	$W(p) = \frac{8(p+2)}{p^2(0,02p+1)(8p+1)}$
10	$W(p) = \frac{p+1}{(10p+1)(3p+4)(0,2p+1)^2}$
11	$W(p) = \frac{4(0,2p+10)(p+2)}{(2p+4)(3p+0,5)(5p+4)^2}$

12	$W(p) = \frac{0.5(2p+4)(5p+4)}{p(p+1)(p+2)(p+3)}$
13	$W(p) = \frac{5p(p+0.4)}{(3p+1)^2(4p+0.5)(10p+1)}$
14	$W(p) = \frac{15(2p+3)}{p^2(8p+1)(0.4p+2)^2}$
15	$W(p) = \frac{0.5(4p+0.1)(2p+0.2)}{p(10p+1)(5p+0.4)(8p+1)}$
16	$W(p) = \frac{10(p+0.2)}{(20p+1)^2(4p+1)(3p+1)^2}$
17	$W(p) = \frac{100(p+1)}{(0.1p+1)(0.2p+1)(10p+1)(5p+1)}$
18	$W(p) = \frac{100(p+1)}{p(0.2p+1)(10p+1)(5p+1)}$
19	$W(p) = \frac{40(p+1)^2}{(10p+1)^3(5p+1)p}$
20	$W(p) = \frac{25(p+4)}{(0.2p+1)^2(0.4p+1)^2(10p+1)}$
21	$W(p) = \frac{4p(p+5)}{(10p+1)^2(3p+2)(4p+1)}$
22	$W(p) = \frac{2(p+5)}{(15p+1)(20p+1)(5p+1)(0.2p+1)}$
23	$W(p) = \frac{30(p+0.4)}{p(20p+1)(10p+1)(0.2p+1)}$
24	$W(p) = \frac{20(p+0.4)^2}{p^2(0.1p+1)(10p+1)}$
25	$W(p) = \frac{10(0.25p+1)}{(3p+5)(2p+1)(8p+1)p}$

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебно-методическому комплексу

С.А. Упоров

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Б1.О.28 ОСНОВЫ СХЕМОТЕХНИКИ

Направление -

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрена на заседании кафедры

Автоматики и компьютерных технологий

Зав.кафедрой

(название кафедры)

(подпись)

Бочков В. С.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 20.09.2023

(Дата)

Рассмотрена методической комиссией

Горно-механического факультета

Председатель

(название факультета)

(подпись)

Осипов П. А.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 20.10.2023

(Дата)

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
Модуль 1. Основы полупроводниковой электроники.....	8
1. Физические основы работы полупроводниковых приборов	9
1.1. Электропроводность полупроводников	9
1.2. Электрические переходы	15
1.3. Смещение p – n -перехода.....	19
1.4. Емкость p – n -перехода	22
1.5. Пробой p – n -перехода	23
1.6. Полупроводниковые диоды.....	25
2. Биполярные транзисторы	27
2.1. Структура и принцип действия биполярного транзистора	27
2.2. Физическая нелинейная модель транзистора и эквивалентные схемы	30
2.3. Способы включения биполярных транзисторов	34
2.4. Основные режимы работы транзистора	35
2.5. h -параметры биполярного транзистора.....	36
2.6. Основные параметры биполярных транзисторов	38
2.7. Транзисторы с инжекционным питанием	40
3. Полевые транзисторы	41
3.1. Транзистор с управляющим p – n -переходом.....	41
3.2. МДП (МОП)-транзисторы	45
3.3. МДП-транзисторы со встроенным каналом	49
3.4. Способы включения полевых транзисторов.....	51
3.5. Полевой транзистор как четырёхполюсник.....	51
3.6. МДП-структуры специального назначения	52
3.7. Нанотранзисторы	54
4. Электронные приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением	58
4.1. Туннельный и обращенный диоды	58
4.2. Двухбазовый диод (однопереходный транзистор).....	59
4.3. Лавинный транзистор.....	61
4.4. Динисторы и тиристоры.....	64
5. Компоненты оптоэлектроники	69
5.1. Излучающие диоды	71
5.2. Фоторезисторы.....	72
5.3. Фотодиоды.....	74
5.4. Фототранзисторы	76
5.5. Оптроны	77

6. Краткая характеристика индикаторов и лазеров	79
6.1. Вакуумные люминесцентные индикаторы	80
6.2. Электrolюминесцентные индикаторы.....	82
6.3. Жидкокристаллические индикаторы	83
6.4. Полупроводниковые знаковосинтезирующие индикаторы	84
6.5. Дисплеи	86
6.6. Лазеры	87
Модуль 2. Основы аналоговой схемотехники электронных средств	92
7. Электронные усилительные устройства	92
7.1. Общие сведения об усилителях электрических сигналов	92
7.2. Основные параметры и характеристики усилителей	94
7.3. Усилительные каскады на биполярных транзисторах.....	101
7.4 Усилительные каскады на полевых транзисторах	110
7.5. Режимы работы усилительных каскадов	115
8. Усилители мощности и усилители постоянного тока.....	117
8.1. Усилители с трансформаторным включением нагрузки....	118
8.2. Безтрансформаторные двухтактные усилители	119
8.3. Усилители постоянного тока	121
8.4. Дифференциальный усилитель	125
8.5. Некоторые схемные решения, используемые в усилителях	129
9. Операционные усилители	133
9.1. Общие сведения	133
9.2. Идеальный операционный усилитель	134
9.3. Основные параметры и характеристики операционных усилителей	136
9.4. Обратные связи в усилительных устройствах.....	140
9.5. Примеры использования операционных усилителей и обратных связей в некоторых схемах.....	144
9.6. Области применения операционных усилителей в электронных схемах.....	150
10. Генераторы электрических колебаний и электронные ключи ...	151
10.1. Общие сведения	151
10.2. Генераторы гармонических сигналов.....	153
10.3. Кварцевые генераторы	155
10.4. Генераторы колебаний прямоугольной формы (мультивибраторы)	156
10.5. Импульсные сигналы	161

10.6. Электронные ключи	164
10.7. Использование МОП-ключей в электронных устройствах с переключаемыми конденсаторами.....	172
Модуль 3. Основы цифровой схемотехники электронных средств	179
11. Основы теории логических (переключаемых) функций	179
11.1. Логические функции и элементы.....	179
11.2. Аксиомы, законы, тождества и теоремы алгебры логики (булевой алгебры)	183
11.3. Представление и преобразование логических функций....	186
11.4. Понятие о минимизации логических функций.....	188
11.5. Структура и принцип действия логических элементов.....	192
11.6. Основные параметры и характеристики логических элементов.....	196
12. Комбинационные логические устройства	201
12.1. Шифраторы и дешифраторы	202
12.2. Мультиплексоры и демультиплексоры	205
12.3. Сумматоры.....	208
12.4. Цифровой компаратор.....	210
12.5. Преобразователи кодов	211
12.6. Арифметико-логическое устройство	213
13. Триггеры и цифровые автоматы.....	214
13.1. Триггерная схема на двух усилительных каскадах.....	215
13.2. RS-триггеры на логических элементах.....	217
13.3. Разновидности RS-триггеров.....	222
13.4. JK-триггеры	227
13.5. D-триггер и T-триггер	229
13.6. Несимметричные триггеры.....	233
13.7. Цифровые автоматы	236
14. Регистры и счётчики	240
14.1. Общие сведения о регистрах	240
14.2. Сдвиговые регистры.....	243
14.3. Синхронные сдвиговые регистры с обратными связями	246
14.4. Функциональные узлы на базе регистров сдвига.....	248
14.5. Электронные счетчики	256
15. Запоминающие электронные устройства	262
15.1. Основные параметры и виды запоминающих устройств ..	262

15.2. Статические оперативные запоминающие устройства.....	264
15.3. Динамические оперативные запоминающие устройства ..	266
15.4. Энергонезависимые оперативные запоминающие устройства.....	267
15.5. Основные структуры оперативных запоминающих устройств.....	269
15.6. Постоянные запоминающие устройства	272
15.7. Структурная схема РПЗУ-ЭС (EPROM)	277
15.8. Постоянные запоминающие устройства РПЗУ-УФ	278
15.9. Условные обозначения микросхем и сигналов управления запоминающими устройствами (примеры УГО ЗУ).....	279
15.10. Флэш-память	281
16. Направления и перспективы развития электроники	284
Литература	288

ВВЕДЕНИЕ

Специалист в любой технической или научной области, тем более связанной с разработкой и применением электронных средств, должен уверенно ориентироваться в мире электроники.

Основное внимание в конспекте лекций уделено изложению принципов действия, свойств и характеристик как элементарных электронных приборов (диодов, транзисторов, микросхем и т.п.), так и электронных устройств и средств, их использующих.

Конспект лекций состоит из описания теоретического материала трёх модулей дисциплины, тематически связанных между собой.

В модуле 1 рассматриваются, в основном, принципы действия и характеристики дискретных электронных приборов, а модули 2 и 3 посвящены основам схемотехники простейших электронных средств.

МОДУЛЬ 1. ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Электроника – отрасль науки и техники, изучающая законы взаимодействия электронов и других заряженных частиц с электромагнитными полями и разрабатывающая методы создания электронных приборов, в которых это взаимодействие используется для преобразования электромагнитной энергии с целью передачи, обработки и хранения информации, автоматизации производственных процессов, создания аппаратуры, устройств и средств контроля, измерения и управления [25].

Различают три основных направления электроники (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Основные направления электроники

С точки зрения применения электронных приборов и устройств в настоящее время наибольшее развитие и распространение получила техническая электроника: аналоговая и цифровая (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Основные направления технической электроники

Информационная электроника составляет основу электронно-вычислительной и информационно-измерительной техники и устройств автоматики. На базе информационной электроники разрабатываются и изготавливаются электронные устройства получения, обработки, передачи, хранения и использования информации, устройства управления различными объектами и технологическими процессами.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

1.1. Электропроводность полупроводников

Полупроводниками называют материалы, удельное сопротивление которых при комнатной температуре (25 – 27 °С) находится в пределах от 10^{-5} до 10^{10} Ом·см и занимающими промежуточное положение между металлами и диэлектриками (металлы ток пропускают, диэлектрики – нет) [8]. Сейчас известно множество полупроводников, их больше, чем металлов и диэлек-

триков. Наиболее известны из полупроводников *Si, Ge, Se, GaS* – арсенид галлия. Существенным свойством полупроводника является возможность в широких пределах изменять свою проводимость под действием температуры, облучения и введения примесей.

Удовлетворительное объяснение этому явлению дает теория электропроводности, согласно которой атом вещества состоит из ядра, окруженного облаком электронов [8]. Электроны находятся в движении на некотором расстоянии от ядра в пределах слоев (оболочек), определяемых их энергией. Каждому из этих слоев можно поставить в соответствие определенный *энергетический уровень* электрона, причем чем дальше электрон находится от ядра, тем выше его энергетический уровень. Совокупность уровней образует *энергетический спектр*. Если электрон переходит с одного энергетического уровня на другой, то происходит либо выделение, либо поглощение энергии, причем это делается порциями – *квантами*.

В структуре атомов можно выделить оболочки, которые полностью заняты электронами (внутренние оболочки) и незаполненные оболочки (внешние). Электроны внешних оболочек слабее связаны с ядром и легче вступают во взаимодействие с другими атомами. Электроны внешних оболочек называют *валентными*.

Для полупроводниковых материалов характерно кристаллическое строение, при котором между атомами возникают так называемые *ковалентные связи* за счет «присвоения» соседних валентных электронов. Это наглядно можно показать на плоской модели кристаллической решетки, например для четырехвалентного германия *Ge* (рис. 1.3).

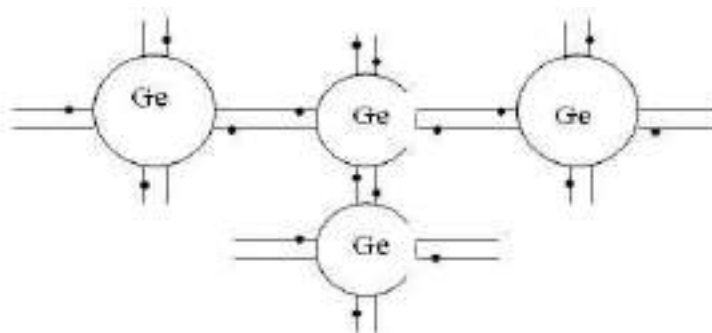


Рис. 1.3. Плоская модель кристаллической решетки *Ge*

Атомы связаны между собой, т.е. их электроны находятся на взаимозависимых энергетических (расщепленных) уровнях, при этом

на каждом уровне (для Ge) находится не более двух электронов. Совокупность энергетических уровней, на которых могут находиться электроны, называют *разрешенными зонами*. Между ними будут в этом случае располагаться *запрещенные зоны*, т.е. энергетические уровни, на которых электроны находиться не могут. В соответствии с зонной теорией по отношению к энергетическим состояниям (уровням) электронов различают *валентную зону*, *запрещенную зону*, *зону проводимости*. В такой интерпретации можно более определенно разделить все вещества на три большие группы: металлы, полупроводники, диэлектрики (рис. 1.4).

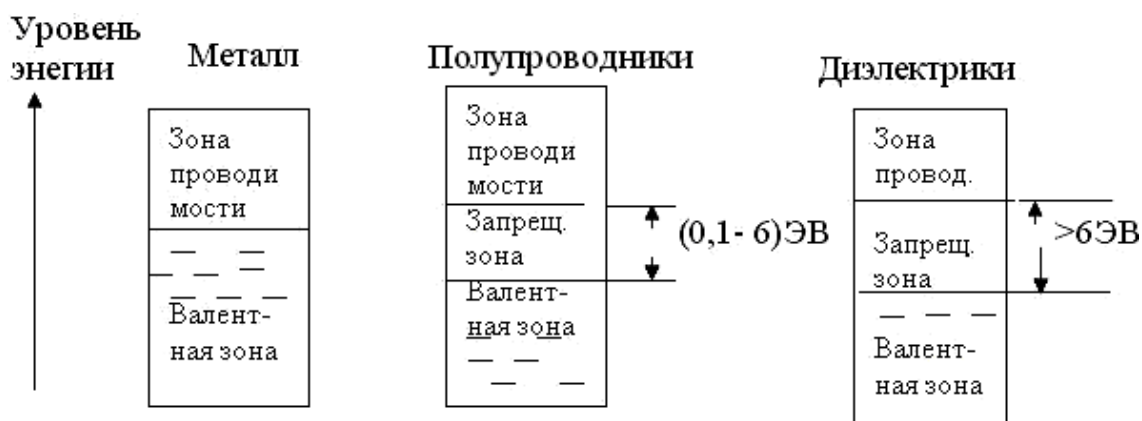


Рис. 1.4. Зонные диаграммы веществ

Зона проводимости – это совокупность расщепленных энергетических уровней, на которые может переходить электрон в процессе взаимодействия атомов или воздействия на атом, например, при нагреве, облучении и т.п.

У полупроводников при некотором значении температуры часть электронов приобретает энергию тепла и оказывается в зоне проводимости. Эти электроны «делают» полупроводник электропроводным. Если электрон «покидает» валентную зону, то образуется свободный энергетический уровень, как бы вакантное место (состояние), которое назвали «дыркой». Валентные электроны соседних атомов могут переходить на эти свободные уровни, при этом создают дырки в других атомах. Такое перемещение электронов рассматривается как движение *положительных зарядов* – «дырок». Соответственно электропроводность, обусловленная движением электронов называется *электронной*, а движением дырок – *дырочной*. У абсолютно чистого и однородного вещества свободные электроны и дырки образуются парно.

Процесс образования положительных и отрицательных зарядов в теле полупроводника можно представить следующим образом. Например, фотон выбивает электрон с его энергетического уровня, электрон становится свободным, а атом приобретает положительный заряд (становится положительно заряженным ионом). Процесс образования пары электрон – «дырка» называют *генерацией* зарядов, обратный процесс – *рекомбинацией* (рис. 1.5).

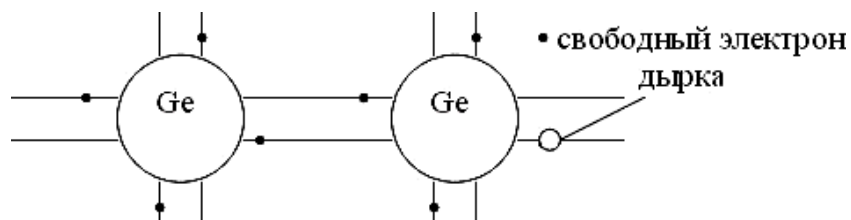


Рис. 1.5. Процессы генерации и рекомбинации

Движение зарядов, обусловленное тепловой энергией, называют *диффузией*. Средний промежуток времени между генерацией и рекомбинацией характеризует так называемое время жизни носителей заряда, а расстояние, которое успевает преодолеть заряд за это время, называется *диффузионной длиной*. Эти характеристики используются для сравнения различных полупроводниковых (ПП) веществ между собой.

Собственная электропроводность полупроводников. Приложим к образцу ПП вещества электроды источника постоянного тока, т.е. создадим в нём электрическое поле с напряженностью E . В этом случае по законам электродинамики электроны и дырки должны перемещаться. Возникнут два встречно направленных потока движения носителей зарядов, в цепи потечет ток, носящий название *ток дрейфа* (*дрейфовый ток*) (рис. 1.6).

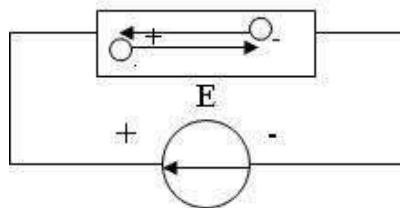


Рис. 1.6. Возникновение тока в полупроводнике

Плотности токов определяются следующим образом:

$$j_n = q_n \cdot n \cdot \mu_n \cdot E; \quad j_p = q_p \cdot p \cdot \mu_p \cdot E, \quad (1.1)$$

где j_n, j_p – плотности токов, созданных соответственно электронами и дырками;

q_n, q_p – заряды электрона и дырки; $q_n = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$;

n, p – удельная концентрация зарядов (количество в единице объема);

μ_n, μ_p – подвижность зарядов, т.е. средняя скорость зарядов под действием электрического поля с напряжённостью поля $E = 1 \text{ В/см}$.

Результирующая плотность дрейфового тока:

$$j_{\text{дрейф}} = E (q_n \cdot n \cdot \mu_n + q_p \cdot p \cdot \mu_p), \quad (1.2)$$

а удельная электропроводность полупроводника:

$$\sigma = j_{\text{дрейф}} E = q_n \cdot n \cdot \mu_n + q_p \cdot p \cdot \mu_p. \quad (1.3)$$

Выражение (1.3) показывает, что удельная собственная электропроводность полупроводника зависит от концентрации зарядов и их подвижности.

Примесная электропроводность полупроводника. Известно, что электропроводность полупроводника зависит от наличия примесей, которые могут быть двух видов: акцепторные и донорные. В структуре вещества примесные атомы «замещают» основные атомы кристаллической решетки, образуя ковалентные связи. Однако, если валентности основного материала и примесного разные, то могут быть два случая (рис. 1.7).

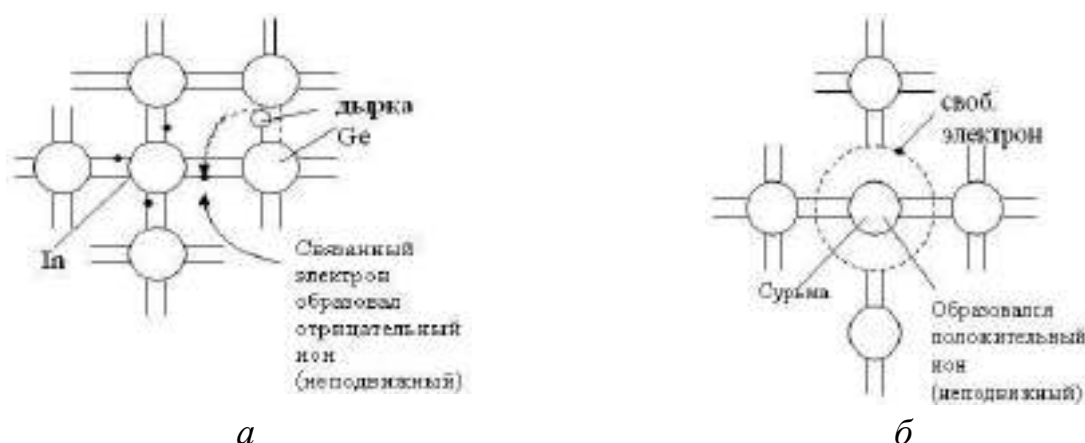


Рис. 1.7. Иллюстрация образования положительных (а) и отрицательных (б) зарядов

Первый случай – валентность примеси меньше, чем у основного материала, например Ge – четырехвалентный, а In – трехвалентный (рис. 1.7, а) В этом случае, чтобы образовать кристаллическую решетку, In «отбирает» один электрон у атома Ge, связывая его в ковалентные связи. Образуется «свободная» дырка – положительно заря-

женный атом Ge. Такой вид примеси называется *акцепторным*. В этом случае полупроводник приобретает дырочную электропроводность и его называют *полупроводник p-типа*.

Второй случай возникает, если валентность примеси больше, чем валентность основного материала (рис. 1.7, б). В этом случае оказывается «свободным» электрон, материал приобретает электронную электропроводность и его называют *полупроводник n-типа*, а примесь – *донорного типа*.

Если обозначить E_C – нижнюю границу зоны проводимости, E_V – верхнюю границу валентной зоны, то $E_C - E_V = \Delta E$ – ширина запрещенной зоны, а E_e – середина запрещенной зоны. Зонные диаграммы для рассмотренных двух случаев будут иметь вид, представленный на рис. 1.8.

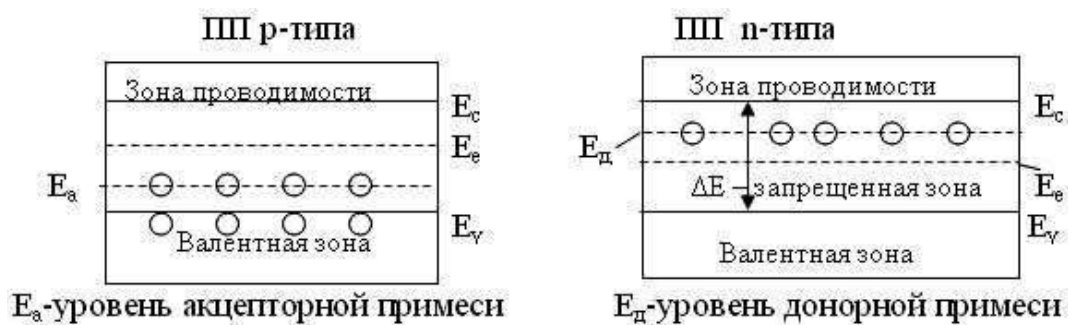


Рис. 1.8. Зонные диаграммы ПП для разных видов примесей

Часто в теории полупроводников взаимодействие и свойства зарядов характеризуются не самой энергией E , а потенциалом, определяемым, как отношение энергии к величине заряда электрона:

$$\phi = E/q.$$

В расчетах используется так называемый *температурный потенциал*, который рассчитывается по формуле:

$$\phi_T = \frac{K \cdot T}{q}, \quad (1.4)$$

где K – постоянная Больцмана, $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$,

T – абсолютная температура, $^{\circ}\text{К}$.

Доказано [8], что

$$n \cdot p = N_c \cdot N_v \cdot e^{-\frac{\Delta E}{kT}} = \text{const}, \quad (1.5)$$

где ΔE – ширина запрещенной зоны.

Таким образом, произведение концентраций носителей зарядов есть величина постоянная при заданной температуре. Здесь N_c и N_v – эффективные плотности состояний соответственно в зоне проводимости и валентной зоне, определяемые массами зарядов и температурой.

Обычно при анализе свойств полупроводников используют *потенциал Ферми*, определяющий энергетические уровни электронов и дырок по отношению к ширине запрещенной зоны и зависящий от концентрации примесей.

$$\varphi_{Fn} = \varphi_E + \varphi_T \cdot \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right), \quad \varphi_{Fp} = \varphi_E - \varphi_T \cdot \ln \left(\frac{N_a}{p_i} \right), \quad (1.6)$$

где N_d, N_a – соответственно концентрации донорной и акцепторной примесей;

n_i, p_i – концентрации собственных носителей зарядов;

$\varphi_E = \frac{(E_c - E_v)}{2 \cdot q}$ – так называемый *электростатический потенциал*

(потенциал середины запрещенной зоны).

1.2. Электрические переходы

Электрический переход – это граничный слой между двумя областями материалов, физические характеристики которых различаются. Переходы могут быть: электронно-дырочные (*p–n-переходы*); электронно-электронные (*n⁺–n-переходы*); дырочно-дырочные (*p⁺–p-переходы*). Знак (+) показывает, что одна область перехода имеет повышенную концентрацию соответствующих носителей.

Широко используются *гетеропереходы*, в которых полупроводниковые материалы (от греч. heteros – другой) имеют различную ширину запрещенной зоны, а также (*p–i, n–i, p–i–n-переходы*), в которых в одной области проводимость собственная, в другой – примесная.

Переходы металл-полупроводник. Свойства этих переходов играют важную роль в электронных приборах, так как электрические выводы от полупроводниковой части микросхем выполняют металлическими проводниками, которые должны допускать хотя бы кратковременное воздействие на них высоких температур при пайке. Электрические переходы образуются не механическим соединением,

а по специальным технологиям. Рассмотрим упрощенную картину процессов на границе металл-полупроводник p -типа. Обозначения, принятые на рис. 1.9, имеют следующий смысл: $\varphi_{\text{Фм}}$, $\varphi_{\text{Фр}}$ – потенциалы Ферми для металла и полупроводника; $\varphi_{\text{Е}}$ – потенциал середины запрещенной зоны; $\varphi_{\text{С}}$, φ_{V} – соответственно потенциалы нижней границы зоны проводимости и потенциал верхней границы валентной зоны полупроводника.

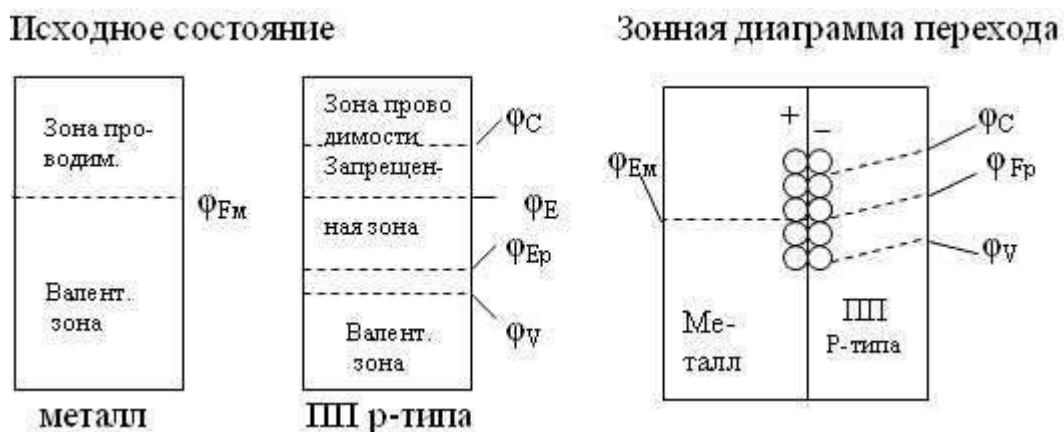


Рис. 1.9. Образование перехода металл-полупроводник

Образование перехода металл-полупроводник обусловлено следующим: $\varphi_{\text{Фм}} > \varphi_{\text{Фр}}$, поэтому электроны проникают в приграничную область полупроводника p -типа, там рекомбинируют с дырками, образуя слой отрицательно заряженных ионов и оставляя в граничном слое металла положительные ионы. В результате у границы образуется свое *внутреннее электрическое поле*, «вытягивающее» электроны из металла и не препятствующее переходу электронов из полупроводника в металл.

Процесс будет идти до тех пор, пока не станут равными потенциалы Ферми и не установится динамическое равновесие. При этом результирующий ток равен нулю, так как образовавшееся электрическое поле препятствует прохождению основных носителей зарядов, а потоки встречного движения зарядов будут одинаковы. У границ контакта образуются объемные заряды, появляется *контактная разность потенциалов*. В полупроводнике концентрация дырок в приграничном слое уменьшится [$n \cdot p = \text{Const}$, см. (1.5)], поэтому этот слой будет иметь повышенное удельное сопротивление.

Приложим к такому переходу внешнее электрическое поле: «+» источника э.д.с. E подключим к полупроводнику, а «–» к металлу. В этом случае внешнее электрическое поле будет направлено встречно внутреннему полю $E_{\text{внутр}}$, созданному зарядами в области перехода

металл-полупроводник (рис. 1.10). Сопротивление приконтактного слоя уменьшится и через переход потечёт ток.

Если сменить полярность внешнего источника, то внешнее электрическое поле еще более увеличит сопротивление приконтактного слоя.

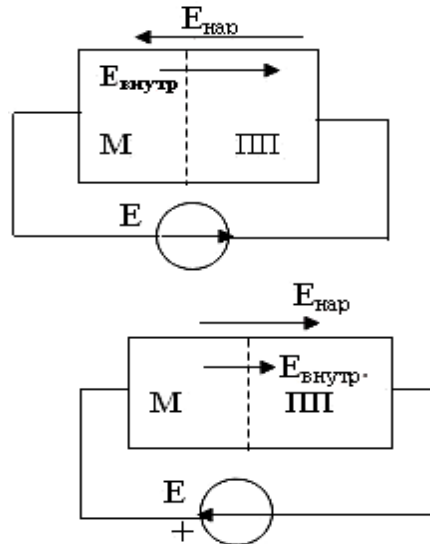


Рис. 1.10. Переход металл (М) – ПП с внешним электрическим полем

В этом случае оба поля не препятствуют прохождению через барьер неосновных носителей заряда, однако их концентрация очень мала и ток ничтожно мал. Таким образом, переход между металлом и полупроводником не одинаково пропускает ток при разной полярности приложенного напряжения. Такой переход назван *барьером Шоттки*. Его главное свойство в том, что он обладает *вентильным* свойством (*односторонней проводимостью*), т.е. пропускает ток только в одном направлении. Аналогичное явление наблюдается, если рассмотреть контакт металла с полупроводником *n*-типа, у которого уровень Ферми выше, чем у металла.

Для практики особо важен случай, когда уровень Ферми металла меньше уровня Ферми ПП *p*-типа, либо выше уровня Ферми ПП *n*-типа. В этом случае граничный слой будет обогащаться основными носителями зарядов и удельное сопротивление граничного слоя понижается. Это явление используется для обеспечения малого переходного сопротивления (омического контакта) в месте присоединения металлических выводов к кристаллу полупроводника.

p–n-переход. *p–n-переход* – это переход между двумя областями полупроводника, имеющими различный тип проводимости. Если концентрации зарядов одинаковы ($p_p \sim n_n$), то переход называется

симметричным. Обычно $n_n \gg p_p$ или $p_p \gg n_n$ (в 100 – 1000 раз) – такие переходы несимметричны.

Рассмотрим явления в p – n -переходе (рис. 1.11), например, если $p_p \gg n_n$.

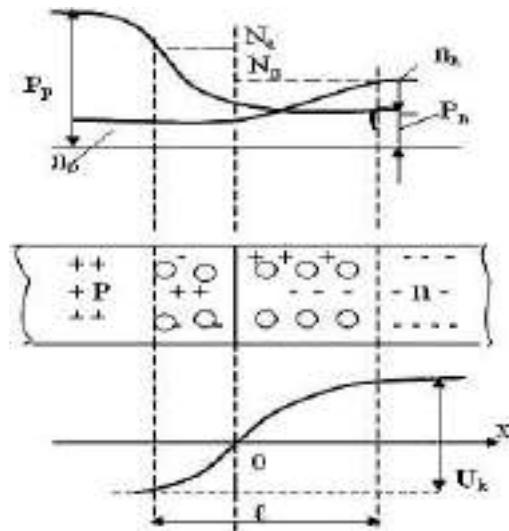


Рис. 1.11. p – n -переход без внешнего электрического поля

Так как концентрация дырок p -области больше, то дырки диффундируют из p -области в n -область, рекомбинируют с электронами этой области и создают в приграничной n -области повышенную концентрацию ионов донорной примеси (положительных зарядов). Электроны из n -области перемещаются в p -область, где их концентрация мала ($n_p \ll n_n$) и рекомбинируют с дырками, создавая повышенную концентрацию отрицательных ионов акцепторной примеси в приграничной p -области. Перемещение происходит до выравнивания потенциалов (уровней) Ферми приграничных областей.

Область образовавшихся неподвижных пространственных зарядов (ионов) называется *областью p – n -перехода*. В этой области концентрации основных носителей зарядов понижены, следовательно удельное сопротивление p – n -перехода выше, чем вдали от перехода. За пределами p – n -перехода заряды взаимно компенсируют друг друга, т.е. полупроводник в целом остается нейтральным. Поле, созданное объемными зарядами, уменьшает поток дырок из области p в область n и поток электронов из области n в область p , однако не препятствует потоку электронов из p области в n и потоку дырок из области n в область p , т.е. поле не препятствует прохождению неосновных носителей через переход. Эти носители имеют тепловое проис-

хождение. Суммарная плотность тока равна нулю, так как потоки неосновных носителей уравниваются друг друга.

Таким образом, в зоне p – n -перехода образуется разность потенциалов, которую называют *потенциальным барьером* либо *контактной разностью потенциалов* U_k .

С некоторыми упрощениями [8] можно считать, что значение U_k зависит от концентрации зарядов:

$$U_k = \varphi_T \ln \left(\frac{N_a \cdot N_d}{n_i} \right), \quad (1.7)$$

где N_a и N_d – соответственно концентрации акцепторной и донорной примесей;

n_i – собственная концентрация электронов.

Принято считать, что для германия (Ge) $U_k \approx 0,3B$, для кремния (Si) $U_k \approx 0,7B$.

1.3. Смещение p – n -перехода

Смещением p – n -перехода называют подачу на переход напряжения постоянного тока. Если «+» источника приложить к области p , а «–» к области n (непосредственно или через другие элементы), то считается, что на переход подано *прямое смещение*. В этом случае потенциальный барьер уменьшится и станет равным $U_1 = U_k - U$ (рис. 1.12). Условный исходный размер p – n -перехода l_0 уменьшится ($l_{см}$ на рис. 1.12) вместе с уменьшением потенциального барьера ($U_1 < U_k$).

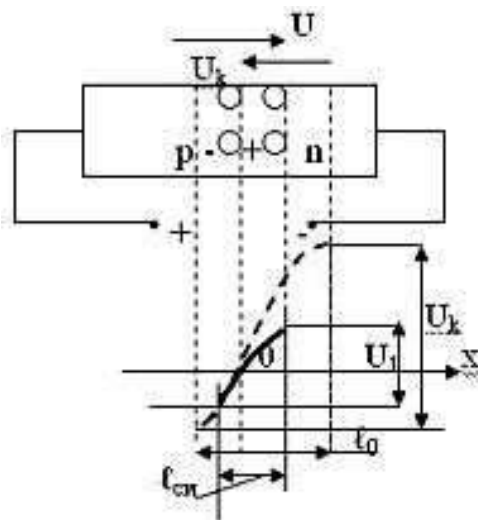


Рис. 1.12. *p–n-переход при прямом смещении*

Картина сохраняется до тех пор, пока $|U_k| > |U|$, ток будет еще мал. Расчетный (условный) размер смещённого *p–n-перехода*:

$$l_{cm} = n \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(U_k - U)}{qN_d}}. \quad (1.8)$$

Ток увеличится незначительно, так как обусловлен диффузионным движением носителей заряда, перемещение которых увеличивается с уменьшением размера перехода и барьера.

Если $U_k = U$, барьер исчезает, ток диффузии увеличивается, через барьер течет ток, называемый *прямым током*. Прямой ток обусловлен токами *дрейфа и диффузии*.

Ток диффузии обусловлен разностью концентраций носителей, а *ток дрейфа* – приложенным напряжением и сопротивлением *p–n-перехода*. Здесь наблюдается явление *инжекции* – введение носителей заряда через переход в ту область, где эти заряды не являются основными (электронов из *n-области* в *p-область* и дырок из *p-области* в *n-область*), из области с большей концентрацией в область с малой концентрацией. Инжекция зарядов происходит из области с малым удельным сопротивлением в область с большим удельным сопротивлением.

Инжектирующий слой с большой концентрацией зарядов (малым удельным сопротивлением) называют *эмиттером*. Слой с малой удельной концентрацией зарядов (большим удельным сопротивлением) называют *базой*.

Установлено, что прямой ток основных носителей заряда, возникающий за счет снижения потенциального барьера, связан с приложенным напряжением экспоненциальным соотношением:

$$I_t' = I_{t0} \cdot e^{\frac{u}{\varphi_T}}, \quad (1.9)$$

где I_{t0} – ток, протекающий через *p–n-переход*, находящийся в равновесном состоянии (*тепловой ток, обратный ток насыщения*).

Однако существует и ток диффузии, направленный встречно, обусловленный тепловым состоянием. Тогда можно считать, что

$$I_{np} = I_t' - I_{t0} = I_{t0} \cdot (e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1), \quad (1.10)$$

где I_{np} – прямой ток через барьер. Особую роль играет ток I_{t0} – обратный ток насыщения. Экспериментально доказано, что он экспоненциально зависит от температуры.

Обратное смещение p – n -перехода. Приложим «+» к n -области, а «–» к p -области полупроводника, т.е. обеспечим обратное смещение на p – n -переходе (рис. 1.13). Теперь потенциальный барьер увеличится ($U_1 = U_k + U$), движение основных зарядов будет затруднено. Ток через переход будет обусловлен неосновными носителями зарядов, которые «вытягиваются» из областей полем обратной полярности. Этот процесс называется «экстракцией». В результате через обратно-смещённый переход будет протекать малый *обратный ток*.

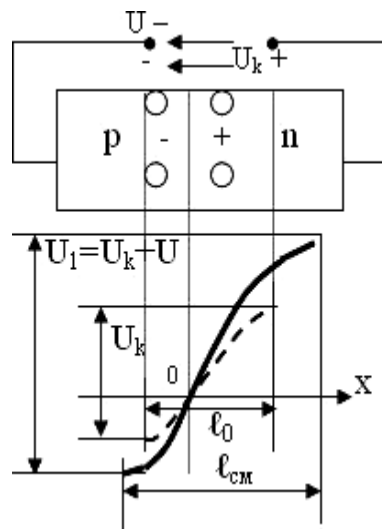


Рис. 1.13. p – n -переход при обратном смещении

Величину обратного тока через переход определим аналогично (1.10), учитывая, что приложенное напряжение значительно больше величины теплового потенциала ($U \gg \phi_t$).

Тогда обратный ток определится по формуле:

$$I_{np} = I_{t0} \cdot \left(\frac{u_{-1}}{e^{\phi_t} - 1} \right) \approx -I_{t0}. \quad (1.11)$$

По выражениям 1.10, 1.11 можно сделать вывод о том, что p – n -переход обладает *вентильным* свойством, которое заключается в том, что при прямом смещении через переход протекает прямой ток, зависящий от приложенного напряжения по экспоненциальному закону, а в случае обратного смещения через p – n -переход течет ма-

лый обратный ток (тепловой ток), который практически от напряжения не зависит, но увеличивается по экспоненциальному закону с увеличением температуры.

Условный исходный размер $p-n$ -перехода l_0 при наличии обратного смещения возрастает до величины l_{cm} (рис. 1.13) вместе с увеличением потенциального барьера ($U_1 > U_k$).

Зависимость тока через $p-n$ -переход от приложенного к нему напряжения называют *вольт-амперной характеристикой (ВАХ) $p-n$ -перехода* (рис. 1.14).

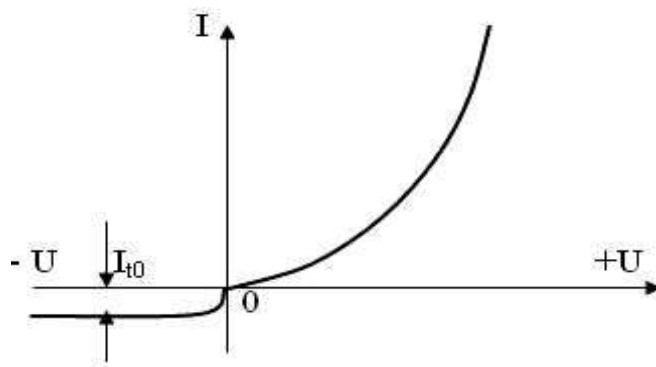


Рис. 1.14. Идеализированная ВАХ $p-n$ -перехода

1.4. Емкость $p-n$ -перехода

Рассматривая электропроводность $p-n$ -перехода при приложении к нему внешнего электрического поля, можно видеть, что толщина $p-n$ -перехода изменяется (модулируется), а по обе стороны границы перехода имеются объемные электрические заряды. Следовательно, $p-n$ -переход должен обладать определенной емкостью. Различают две составляющих емкости: *барьерную*, отражающую перераспределение зарядов в $p-n$ -переходе, и *диффузионную*, отражающую перераспределение зарядов вблизи $p-n$ -перехода. При прямом смещении проявляется в основном диффузионная емкость C_{diff} . При обратном смещении большую роль играет барьерная емкость $C_{бар}$ [2].

Емкость $C_{бар}$ обусловлена наличием в $p-n$ -переходе ионов донорной и акцепторной примесей, как бы образующих две обкладки конденсатора:

$$C_{бар} = \left(\epsilon \epsilon_0 \cdot \frac{S}{l_{cm}} \right) \cdot n \sqrt{\frac{U_k}{U_k + |U|}}, \quad (1.12)$$

где U_k — значение контактной разности потенциалов;

U – приложенное напряжение;

l_0 – толщина p – n перехода при $U = 0$;

– относительная диэлектрическая проницаемость материала;

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

S – площадь поперечного сечения p – n -перехода;

$n = 2$ для резких переходов, $n = 3$ для плавных переходов.

С увеличением приложенного обратного напряжения барьерная емкость $C_{бар}$ уменьшается из-за увеличения толщины перехода. Величина $C_{диф}$ отражает физический процесс изменения концентрации подвижных носителей заряда, накопленных вследствие изменения концентраций инжектированных носителей при изменениях приложенного напряжения. $C_{диф}$ значительно меньше $C_{бар}$ и очень слабо зависит от приложенного напряжения. Зависимость барьерной ёмкости от напряжения (рис. 1.15) ощутимее, поэтому часто используется в электронике.

$C_{диф}$ зависит от величины прямого тока, протекавшего через p – n -переход в момент начала изменения приложенного напряжения. Это имеет важное значение при изготовлении быстродействующих полупроводниковых приборов.

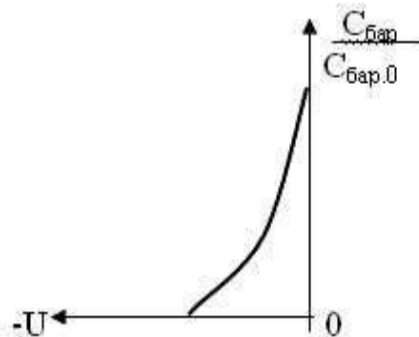


Рис. 1.15. Зависимость $C_{бар}(U)$ при обратном смещении p – n -перехода

1.5. Пробой p – n -перехода

Пробоем называется значительное уменьшение сопротивления перехода при обратном смещении, сопровождающееся возрастанием обратного тока. Различают три вида пробоя: туннельный, лавинный и тепловой.

Туннельный пробой обусловлен туннельным эффектом, т.е. прохождением электронов сквозь потенциальный барьер (из валентной зоны одного полупроводника в зону проводимости другого), высота которого больше, чем энергия носителей заряда (рис. 1.16) [9].

В этом случае энергетические зоны искривляются настолько, что $\varphi_{vp} > \varphi_{cp}$, т.е. энергия электронов валентной зоны полупроводника p -типа становится равной энергии электронов зоны проводимости полупроводника n -типа.

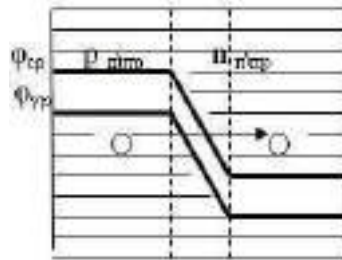


Рис. 1.16. Зонные диаграммы при туннельном пробое

Лавинный пробой вызывается ударной ионизацией, когда напряженность электрического поля при обратном смещении так велика, что неосновные носители заряда, движущиеся через p – n -переход, ускоряются настолько, что при соударении с атомами ионизируют их. Появляются пары электрон-дырка, которые ускоряются и ионизируют другие атомы. Процесс нарастает лавинообразно, при этом величина тока ограничивается только внешним сопротивлением.

Ток лавинного пробоя можно приближенно определить по формуле:

$$I_{\text{лав}} = M_{\text{л}} I_{\text{обр}}, \quad (1.13)$$

где $M_{\text{л}}$ – коэффициент лавинного умножения.

Лавинный пробой возникает в сравнительно высокоомных ПП, (имеющих большое удельное сопротивление, т.е. малую концентрацию основных носителей) и при достаточно большой ширине p – n -перехода.

ВАХ перехода при различных видах пробоев показаны на рис. 1.17. Напряжение лавинного пробоя зависит от температуры и увеличивается с ее ростом (из-за сокращения длины свободного пробега носителей заряда).

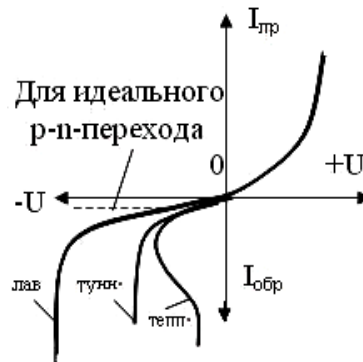


Рис. 1.17. ВАХ реального p – n -перехода

Тепловой пробой возникает в результате разогрева p – n -перехода, когда количество тепла, выделяемое током в p – n -переходе, больше количества тепла, отводимого от него. Известно, что увеличение температуры приводит к увеличению интенсивности генерации электронно-дырочных пар, что выражается в увеличении обратного тока по экспоненциальному закону. Это в свою очередь увеличивает температуру p – n -перехода, в результате чего наступает тепловой пробой. ВАХ p – n -перехода при тепловом пробое отличается от ВАХ при туннельном и лавинном пробоях (с увеличением тока теплового пробоя падает напряжение, приложенное к p – n -переходу).

1.6. Полупроводниковые диоды

Диод – это полупроводниковый прибор с одним p – n -переходом и двумя выводами. Рассмотренные выше свойства p – n -перехода дают возможность рассматривать свойства диодов путем анализа их ВАХ (рис. 1.18) Полупроводниковый диод можно получить из ПП с p – n -переходом, если снабдить этот полупроводник омическими (металлическими) контактами. Наиболее распространены германиевые и кремниевые диоды.

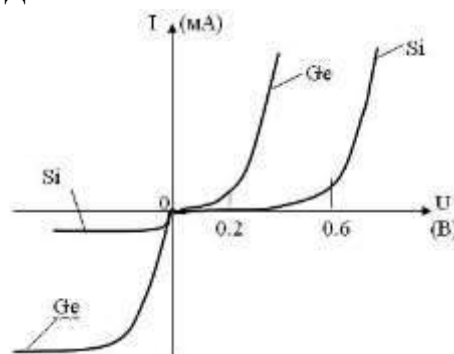


Рис. 1.18. ВАХ германиевого и кремниевого диодов

Краткая классификация диодов. Диоды, как наиболее многочисленные полупроводниковые приборы, классифицируют по различным признакам: назначению, конструкции, току и напряжению, по частоте, видам устойчивости к воздействиям внешней среды и т.д. (рис. 1.19) [13].

Назначение диодов. Различают диоды выпрямительные, импульсные, туннельные, обращенные и т.п.

Выпрямительные диоды используются для выпрямления переменного тока (преобразования переменного тока в постоянный). *Импульсные* диоды предназначены для работы в импульсных цепях, так как отличаются малой емкостью p – n -перехода и другими характеристиками, обеспечивающими быстрое действие. Разновидность импульсных диодов – диоды Шоттки, выполненные на основе перехода металл-полупроводник, отличающиеся очень малыми (нА) обратными токами.



Рис. 1.19. Примерная классификация диодов

Туннельные диоды (ТД) – диоды, в которых туннельный эффект приводит к появлению на ВАХ участка с отрицательным сопротивлением (рис. 1.20). Участок 0-1 (рис. 1.20) определяется дрейфовым током. Участок 1-2 имеет отрицательное сопротивление. Участок 2-3 определяется диффузионным током. ТД используют в генераторах высокой частоты (до 1 ГГц).

Обращенный диод служит для выпрямления малых напряжений.

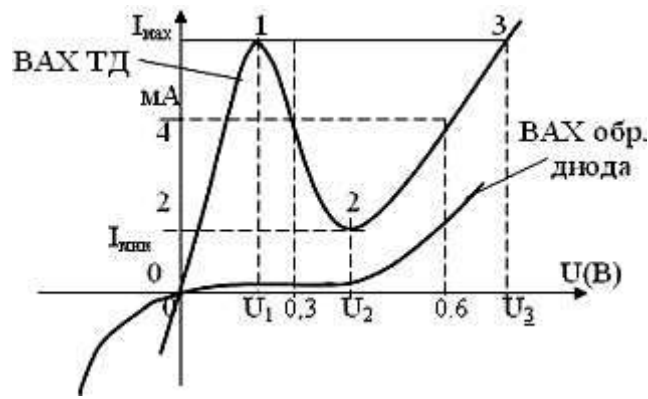


Рис. 1.20. ВАХ туннельного и обращенного диодов

Стабилитроны – полупроводниковые диоды, напряжение на которых в области электрического пробоя слабо зависит от тока. Предназначены для стабилизации напряжения.

Варикапы – полупроводниковые диоды, предназначенные для использования в качестве емкости, управляемой электрическим напряжением. Варикап работает при обратном смещении p – n -перехода, его емкость определяют согласно формуле:

$$C = C_0 \cdot \left[\frac{U_k}{U_k + |U|} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (1.14)$$

где $n=2$ для резких и $n=3$ для плавных переходов;

U_k – значение контактной разности потенциалов;

U – приложенное обратное напряжение;

C_0 – начальная емкость p – n -перехода.

Варикап, используемый в умножителях частоты, называют *варактором*.

Фотодиоды, светодиоды – диоды, использующие эффект взаимодействия оптического излучения (видимого, инфракрасного) с носителями заряда в зоне p – n -перехода. В фотодиодах при облучении повышается обратный ток, в светодиодах в режиме прямого тока в зоне p – n -перехода возникает видимое или инфракрасное излучение.

Имеются еще *магнитодиоды, тензодиоды*, в которых меняется электропроводность под действием магнитного поля или механических деформаций [9].

2. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

2.1. Структура и принцип действия биполярного транзистора

Транзистор – прибор, содержащий два или более электронно-дырочных перехода, имеющий не менее трех выводов и пригодный для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов.

Упрощенные структурные схемы и условные обозначения транзисторов изображены на рис. 2.1.

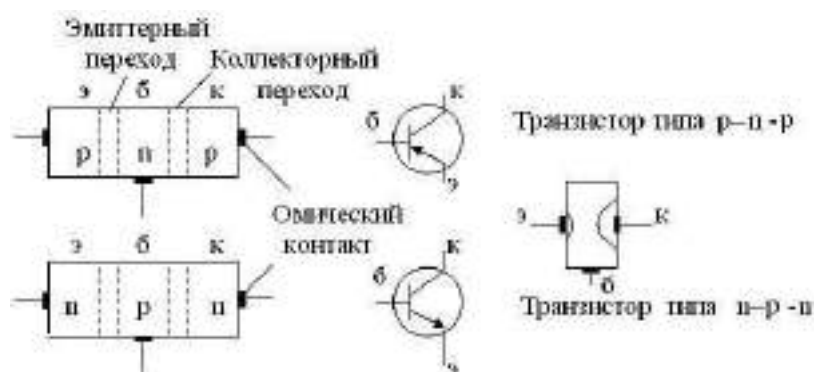


Рис. 2.1. Структурные схемы и условные графические обозначения (УГО) биполярных транзисторов

Транзистор изготавливается по специальной технологии на кристалле полупроводника путем создания трех областей с различной проводимостью. Средняя область – *база*, другие называются *эмиттер* и *коллектор*. Между областями образуется два $p-n$ -перехода, связанных между собой. Область, являющаяся источником носителей заряда при прямом смещении, называют эмиттером. Область, выполняющая функцию собирания зарядов, называют коллектором. На практике этими терминами называют выводы прибора. Соответственно $p-n$ -переходы называют эмиттерным и коллекторным. В обычном включении на эмиттер относительно базы подается напряжение, создающее прямое смещение, а на коллектор – обратное смещение. Иногда используется так называемое инверсное включение, при котором коллектор и эмиттер меняются местами. При этом можно

иметь различные способы включения транзистора: по схеме с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК). На рис. 2.2 изображены названные выше три способа включения биполярного транзистора со структурой $p-n-p$ с указанием условных входа, выхода и обозначением электродов (э – эмиттер, к – коллектор, б – база). Показаны также направления протекания токов в электродах (выводах) транзистора.

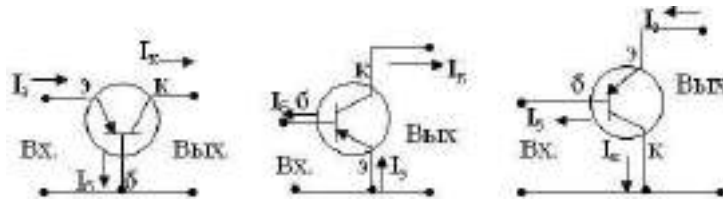


Рис. 2.2. Три схемы включения биполярного транзистора

Соединив между собой два любых электрода, можно получить различные диодные структуры.

Рассмотрим принцип действия транзистора, включив его по схеме с ОБ (рис. 2.3).

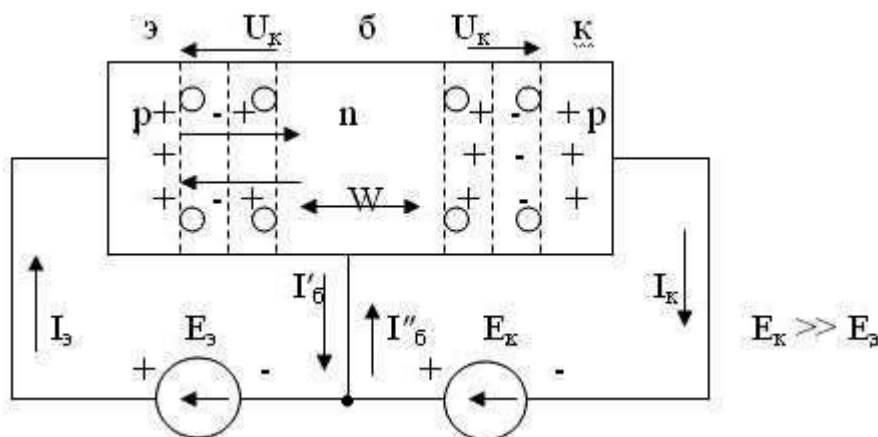


Рис. 2.3. Структурная схема включения транзистора по схеме ОБ

В структуре кристалла происходит инжекция дырок в область базы и встречное движение электронов в эмиттер, при этом

$$I_{эp} = \gamma \cdot I_{э}; \gamma = I_{эp} / I_{э}, \quad (2.1)$$

где $I_{эp}$ – ток, обусловленный движением дырок;

$I_{э}$ – полный ток через эмиттерный $p-n$ -переход;

γ – коэффициент инжекции.

Дырки, проникающие в базу, частично компенсируются притоком электронов от источника $E_{э}$, создавая ток $I'_{б}$. Главная особенность лю-

бего транзистора – ширина базы во много раз меньше диффузионной длины:

$$W \ll 0,2l_{\text{диф}},$$

где $l_{\text{диф}}$ – диффузионная длина (среднестатистическая величина свободного пути заряда).

По этой причине основные носители заряда из эмиттера (дырки) диффундируют в область базы и достигают второго p – n -перехода, смещённого в обратном направлении. Большинство дырок не успевают рекомбинировать с электронами и попадают вблизи коллекторного перехода в поле, втягивающее их в область коллектора (экстракция дырок). Электроны, число которых равно числу дырок, ушедших через коллекторный переход, уходят через базовый вывод, создавая составляющую тока базы I'_b .

Относительное число *неосновных для базы* носителей заряда (дырок), достигших коллекторного перехода, характеризуется коэффициентом переноса χ , показывающим, что только часть тока $I_{\text{эп}}$ достигает коллектора – это $I_{\text{кр}}$:

$$I_{\text{кр}} = \chi \cdot I_{\text{эп}}; \chi = I_{\text{кр}} / I_{\text{эп}}; \quad (2.2)$$

где $I_{\text{кр}}$ и $I_{\text{эп}}$ – дырочные составляющие токов коллектора и эмиттера.

Учитывая, что только часть носителей достигает коллектора, можем записать

$$I_{\text{кр}} = \alpha \cdot I_{\text{эп}}, \quad (2.3)$$

где $\alpha = \gamma \cdot \chi = I_{\text{кр}} / I_{\text{эп}}$ – коэффициент передачи тока в схеме ОБ.

Известно [18], что через коллекторный p – n -переход обязательно будет течь ток *неосновных для коллектора* носителей, создающих ток $I_{\text{кбо}}$ – неуправляемый ток p – n -перехода (обратный ток). Результирующий ток в коллекторной цепи:

$$I_k = \alpha \cdot I_{\text{эп}} + I_{\text{кбо}}. \quad (2.4)$$

2.2. Физическая нелинейная модель транзистора и эквивалентные схемы

Упрощенная эквивалентная схема идеализированного транзистора, имеющего структуру $p-n-p$ [2], представлена на рис. 2.4.

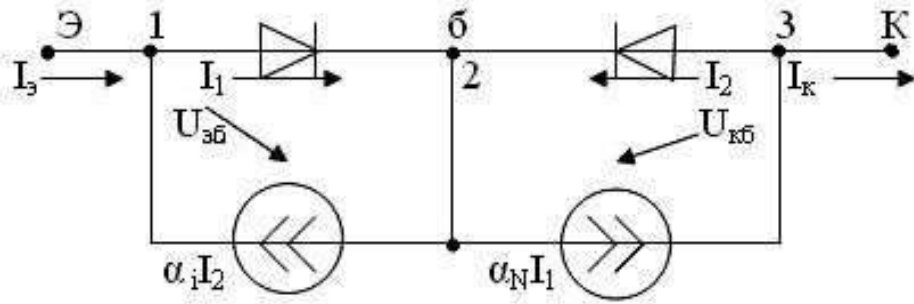


Рис. 2.4. Упрощенная эквивалентная схема биполярного транзистора

Коэффициенты α_i , α_N – это коэффициенты передачи тока, учитывающие тот факт, что не все заряды достигают соответствующих областей через переходы при инверсном (α_i) и прямом (нормальном) (α_N) включении ($\alpha_N < 1$, $\alpha_i \ll \alpha_N$). Формально можно записать:

$$\begin{aligned} I_э &= I_1 - \alpha_i \cdot I_2, \\ I_k &= \alpha_N \cdot I_1 - I_2. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Токи через $p-n$ -переходы можно выразить известным способом через так называемые токи насыщения:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{нас.э} \left[e^{\frac{U_{эб}}{\varphi_T}} - 1 \right], \text{ если } U_{кб} = 0, \text{ а } U_{эб} > 0, \\ I_2 &= I_{нас.к} \left[e^{\frac{U_{кб}}{\varphi_T}} - 1 \right], \text{ если } U_{эб} = 0, \text{ а } U_{кб} < 0. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Токи I_1 и I_2 удобнее выразить через обратные токи переходов, учитывая, что в справочниках [15] приводятся значения именно обратных токов:

$$\begin{aligned} I_{эб} &= 0, \text{ при } U_{кб} = 0 \text{ и } I_k = 0, U_{эб} < 0 \\ I_{кб} &= 0, \text{ при } U_{эб} = 0 \text{ и } I_э = 0, U_{кб} < 0 \end{aligned}$$

В этом случае

$$I_{нас.к} = \frac{I_{кб\ o}}{1 - \alpha_i \cdot \alpha_N}; I_{нас.э} = \frac{I_{эб\ o}}{1 - \alpha_i \cdot \alpha_N}. \quad (2.7)$$

Возвращаясь к (2.5), с учетом (2.6, 2.7), получим:

$$I_э = \frac{I_{эб\ o}}{(1 - \alpha_i \cdot \alpha_N) \cdot \left(e^{\frac{U_{эб}}{\varphi_T}} - 1 \right)} - \frac{\alpha_i \cdot I_{кб\ o}}{(1 - \alpha_i \cdot \alpha_N) \cdot \left(e^{\frac{U_{кб}}{\varphi_T}} - 1 \right)},$$

$$I_к = \frac{\alpha_N}{(1 - \alpha_i \cdot \alpha_N) \cdot I_{эб\ o} \cdot \left(e^{\frac{U_{эб}}{\varphi_T}} - 1 \right)} - \frac{I_{кб\ o}}{(1 - \alpha_i \cdot \alpha_N) \cdot \left(e^{\frac{U_{кб}}{\varphi_T}} - 1 \right)}, \quad (2.8)$$

$$I_б = I_э - I_к.$$

Полученная система уравнений носит название уравнения Эберса – Молла. Характеристики, соответствующие этим уравнениям, приведены на рис. 2.5.

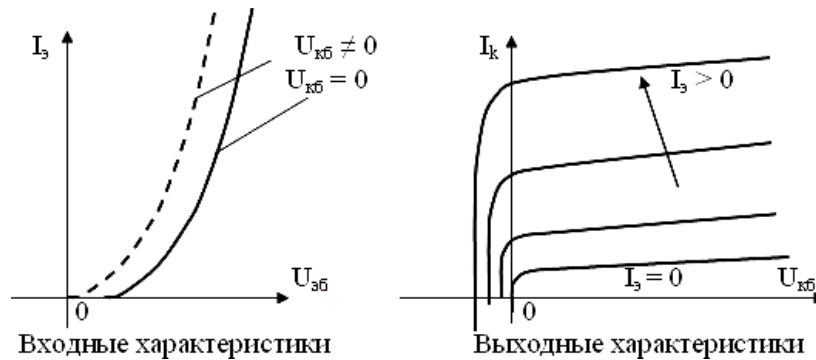


Рис. 2.5. Статические характеристики транзистора, включённого по схеме ОБ

Рассмотренная физическая модель нелинейна и применяется для анализа работы только при относительно больших изменениях напряжения и тока.

Во многих случаях на фоне сравнительно больших постоянных составляющих токов и напряжений на транзистор действуют малые переменные составляющие. В этом случае эти составляющие могут анализироваться отдельно, причем при анализе переменных составляющих используются *малосигнальные эквивалентные схемы*, состоящие из линейных элементов. Параметры линейных элементов

получают линеаризацией исходных статических характеристик транзисторов в окрестности режима работы по постоянному току.

Наиболее часто встречается Т-образная эквивалентная схема. Для транзистора, включенного по схеме ОБ, Т-образная схема имеет вид, представленный на рис. 2.6.

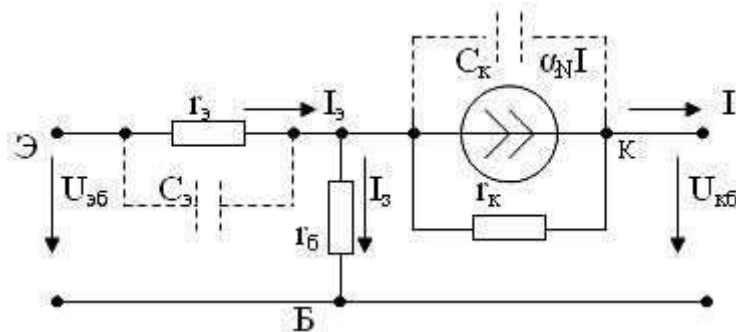


Рис. 2.6. Вариант Т-образной схемы замещения транзистора:

$r_э, r_k$ – дифференциальные сопротивления переходов;

$r_б$ – сопротивление базы; включение нормальное (неинверсное), коэффициент передачи тока $\alpha_N = \alpha$; $C_k, C_э$ – ёмкости переходов

Т-образная схема (рис 2.6) не единственная. Наиболее распространенные варианты приводятся на рис. 2.7 и 2.8.

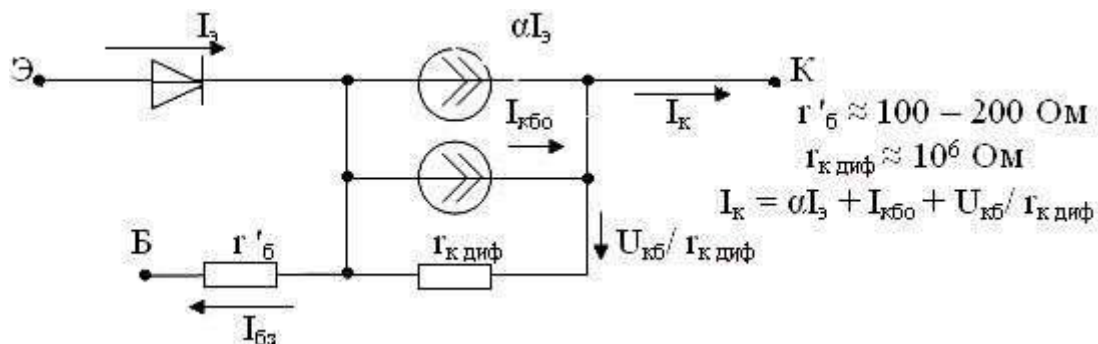


Рис. 2.7. Вариант схемы замещения транзистора, включенного по схеме ОБ

Т-образная эквивалентная схема транзистора, включенного по схеме ОЭ, представлена на рис. 2.8. В схему введен диод, отражающий наличие $p-n$ -перехода Э-Б. Ток базы $I_{бз}$ в цепи коллектора увеличивается в β раз, причем $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$. Статические характеристики для схемы с ОЭ показаны на рис. 2.9.

В схеме замещения (рис. 2.8) отражается факт зависимости тока коллектора от тока базы и свойств транзистора, учитываемых коэффициентом β , который называется *коэффициентом усиления базового тока в схеме ОЭ*. Коэффициент передачи тока $\alpha < 1$, поэтому $\beta > 1$.

Анализируя выражения (2.8), можно заметить два важных обстоятельства:

1) при отсутствии тока базы (обрыв базы) обратный ток в цепи коллектор – эмиттер увеличивается многократно;

2) сопротивление коллекторного перехода $r'_{к\text{диф}} \ll r_{к\text{диф}}$, где $r_{к\text{диф}}$ – сопротивление коллекторного перехода в схеме замещения ОБ (рис. 2.7).

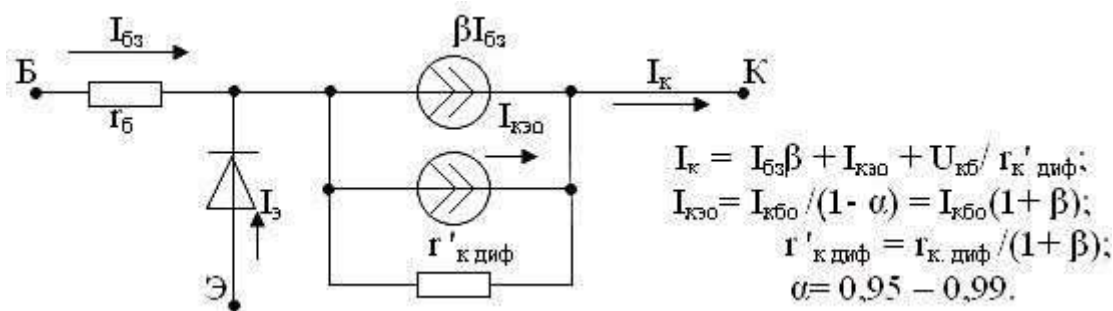


Рис. 2.8. Т-образная схема замещения транзистора, включённого по схеме ОЭ

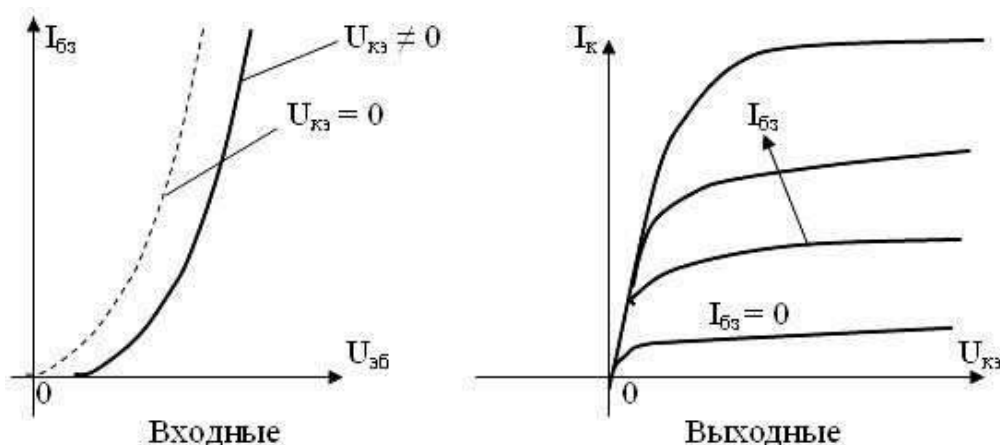


Рис. 2.9. Статические характеристики для схемы ОЭ

2.3. Способы включения биполярных транзисторов

В электрических схемах биполярные транзисторы могут включаться тремя различными способами: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК) (рис. 2.2). Название способа включения происходит от названия того электрода биполярного транзистора, который в рассматриваемой схеме является общим для входного и выходного контуров электрической цепи.

Важность способа включения транзистора состоит в том, что схемы в зависимости от этого приобретают разные свойства при совершенно одинаковых параметрах транзисторов.

Примеры возможных способов включения транзисторов показаны на рис. 2.10.

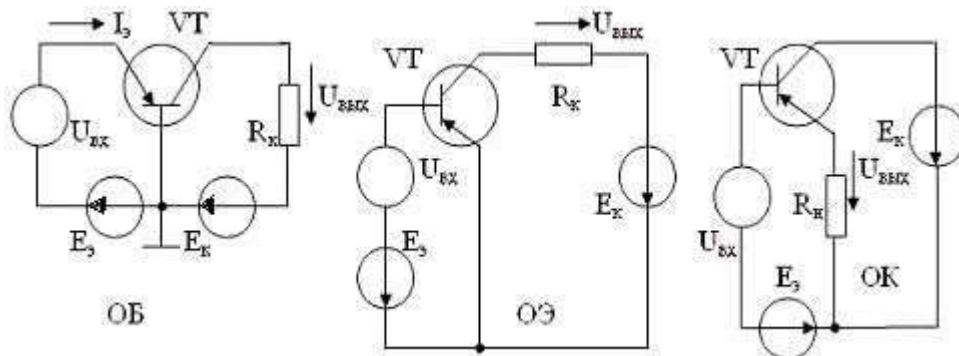


Рис. 2.10. Три способа включения биполярного транзистора в электрической схеме с источниками питания, смещения и входного сигнала:

$U_{вх}$ – входной (усиливаемый) сигнал; $E_з$, $E_к$ – источники эмиттерного и коллекторного смещений (внешние источники питания); $R_к$ – резистор для ограничения тока в цепи коллектора в схемах ОБ и ОЭ (или сопротивление нагрузки); R_H – резистор (сопротивление нагрузки) в цепи эмиттера схемы ОК

Отличительным признаком схемы ОК является отсутствие ограничивающего резистора в цепи коллектора. Схему ОК часто называют *эмиттерным повторителем*.

Каждая из схем использует биполярный транзистор в качестве элемента, обеспечивающего усиление входного сигнала $U_{вх}$. Стрелки напряжения $U_{вх}$ не показаны, так как это напряжение может быть положительным, отрицательным либо переменным. Рассматриваемые схемы обладают разными свойствами при совершенно одинаковых, включенных по-разному, транзисторах.

Принцип усиления входного сигнала для схем одинаков. Он состоит в том, что входной сигнал воздействует на базовую (управляющую) цепь транзистора и вызывает изменение сопротивления основной (управляемой) цепи (коллектор – эмиттер) транзистора, вследствие чего ток в этой цепи, созданный источником питания, будет изменяться, обеспечивая изменение выходного напряжения $U_{вых}$. При этом вследствие нелинейности характеристик транзистора малые изменения $U_{вх}$ могут вызвать гораздо большие изменения выходного сигнала $U_{вых}$, создавая эффект усиления входного сигнала.

Области использования схем определяются их разными свойствами, наибольшее распространение получили схемы ОЭ и ОК.

2.4. Основные режимы работы транзистора

Различают три основных режима работы транзистора: активный, отсечки, насыщения.

Активный режим – нормальный: эмиттер смещен в прямом направлении, коллектор – в обратном. *Инверсный режим* – наоборот. В уравнениях в нормальном активном режиме $U_{эб}$ имеет знак «+», $U_{кб}$ имеет знак «-».

Режим отсечки: глубокая отсечка – оба перехода смещены в обратном направлении, причем модули этих напряжений должны быть:

$$U > (3 - 5) m \varphi_T,$$

где $m \approx (1,5 - 2)$.

В режиме отсечки $I_k = I_{кбо}$. Режим отсечки характеризует закрытое состояние транзистора (транзистор заперт), при котором его сопротивление максимально, токи – минимальны.

Режим насыщения характеризует открытое состояние транзистора, когда его сопротивление минимально, а токи определяются внешними источниками, но не должны превышать некоторых допустимых значений. В режиме насыщения оба перехода транзистора с помощью внешних напряжений смещены в прямом направлении. Напряжение транзистора $U_{кэ}$ минимально:

$$U_{кэ \text{ нас}} \approx \varphi_T (1 - \alpha_i) / \alpha_i. \quad (2.9)$$

Ток коллектора $I_k \leq I_{k \text{ max}}$.

Режим отсечки и насыщения широко используется в электронных ключах. Достигаются эти режимы различными способами, в том числе и изменением подводимых к транзистору напряжений.

2.5. h -параметры биполярного транзистора

Транзистор можно представить в расчетном отношении как активный четырехполюсник, имеющий два входных и два выходных зажима (рис. 2.11). Это представление во многих случаях существенно упрощает расчеты схем с транзисторами.

Согласно теории электрических цепей [11] связь между токами и напряжениями четырехполюсника может быть показана с помощью системы уравнений:

$$U_1 = h_{11} i_1 + h_{12} U_2, i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} U_2. \quad (2.10)$$

Коэффициенты h , входящие в уравнения, получили название « h -параметры».

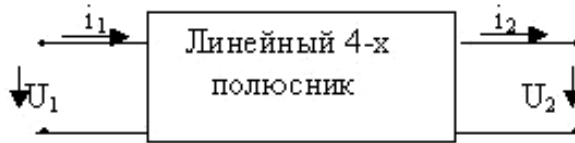


Рис. 2.11. Четырехполюсник – аналог транзистора:

i_1, i_2 – входной и выходной токи, V_1, V_2 – входное и выходное напряжения

Физический смысл этих коэффициентов выясняется, если рассматривать два характерных режима: холостой ход (ХХ) и короткое замыкание (КЗ) на входе и выходе четырехполюсника. Режим ХХ характеризуется отсутствием тока при наличии напряжения, режим КЗ – отсутствием напряжения при наличии тока. В этих случаях:

$h_{11} = U_1 / i_1 (U_2 = 0)$ – входное сопротивление при КЗ на выходе;

$h_{12} = U_1 / U_2 (i_1 = 0)$ – коэффициент передачи напряжения при ХХ на входе (коэффициент обратной связи по напряжению);

$h_{21} = i_2 / i_1 (U_2 = 0)$ – коэффициент передачи тока при КЗ на выходе;

$h_{22} = i_2 / U_2 (i_1 = 0)$ – выходная проводимость при ХХ на входе.

В усилительных устройствах с транзисторами h -параметры определяют обычно по соотношениям между приращениями токов и напряжений. Например, для схемы с общим эмиттером:

$$\Delta U_{бэ} = h_{11э} \Delta I_{бз} + h_{12э} \Delta U_{кэ}, \quad (2.13)$$

$$\Delta I_{к} = h_{21э} \Delta I_{бз} + h_{22э} \Delta U_{кэ}.$$

Получив опытным путем входные и выходные характеристики, можно вычислить h -параметры, как частные производные в заданных точках характеристик, полагая неизменными нужные величины. Например, в схеме ОЭ:

$$\begin{aligned} h_{11э} &= \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{бз}} \right|_{\substack{U_{кэ} = \text{Const} \\ (\Delta U_{кэ} = 0)}} & h_{12э} &= \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{бз} = \text{Const};} \\ h_{21э} &= \left. \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{бз}} \right|_{\substack{U_{кэ} = \text{Const} \\ (\Delta U_{кэ} = 0)}} & ; & h_{22э} &= \left. \frac{\Delta I_{к}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{бз} = \text{Const};} \end{aligned} \quad (2.14)$$

h -параметры определяются для любой из трех схем включения транзистора, чаще всего используются $h_{nnэ}$, причем система

h -параметров позволяет в расчетах использовать обобщенную схему замещения транзистора для h -параметров, показанную на рис. 2.12.

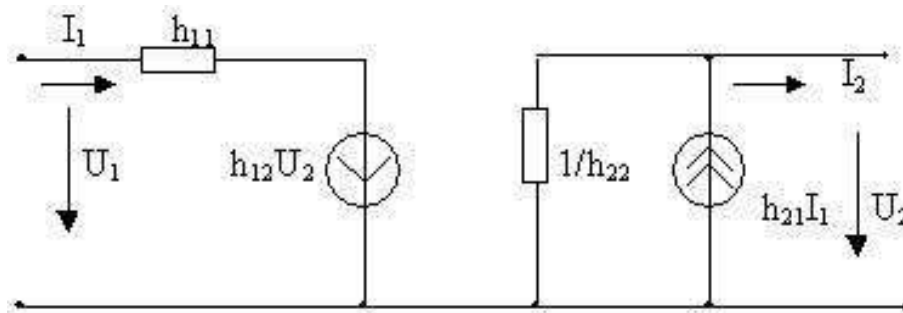


Рис. 2.12. Обобщенная схема замещения биполярного транзистора

Упрощенные (пренебрегаем h_{12}) схемы замещения транзисторов для h -параметров будут иметь вид, представленный на рис. 2.13.

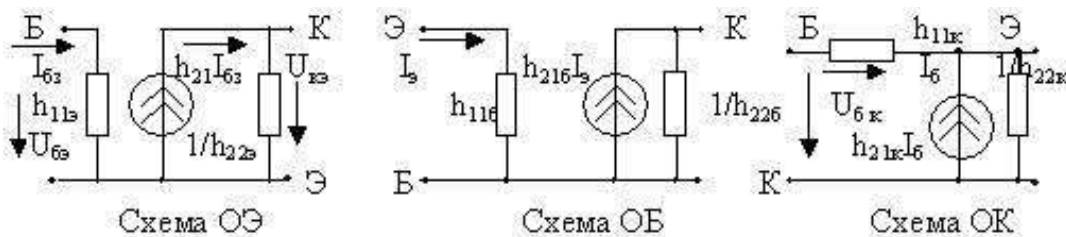


Рис. 2.13. Схемы замещения транзисторов в h -параметрах

2.6. Основные параметры биполярных транзисторов

К основным параметрам биполярных транзисторов относятся:

1. Коэффициенты $h_{21э}$, $h_{21б}$, $h_{21к}$ – это коэффициенты передачи тока (коэффициенты усиления по току) (в схеме ОЭ $h_{21э}$ – это β , в схеме ОБ $h_{21б}$ – α).

2. Граничная частота для коэффициента передачи тока – это частота, на которой $h_{21э}$ уменьшается до 1.

3. Частота усиления $f(h_{21})$ – это частота, на которой $h_{21э}$ уменьшается в $\sqrt{2}$ раз – этим значением определяется так называемая полоса пропускания частот, т.е. диапазон частот, в которых характеристики усиления удовлетворительны.

4. Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода в схеме ОЭ

$$h_{11э} = r_{э \text{ диф}} = \left. \frac{dU_{эб}}{dI_{эб}} \right|_{U_{кэ} = \text{Const}}$$

(Значения $h_{11э}$ – Омы, десятки Ом).

5. Выходная проводимость $h_{22э}$ связана с дифференциальным сопротивлением коллекторного перехода.

$$\frac{1}{h_{22э}} = r_{к \text{ диф}} = \left. \frac{dU_{кэ}}{dI_{к}} \right|_{I_{б} = \text{Const}}$$

6. Коэффициент обратной связи по напряжению:

$$h_{12э} = \left. \frac{dU_{бэ}}{dU_{кэ}} \right|_{I_{б} = \text{Const}}, \quad h_{12э} \approx 10^{-3} \cdot 10^{-4}$$

7. Объемное сопротивление базы: $r_{б}$ = (десятки – сотни Ом).

8. Емкость коллекторного перехода $C_{к}$. Это фактически барьерная емкость коллекторного перехода $C_{к} \approx (5 - 50) \text{ pF}$.

9. Максимальная частота генерации:

$$f_{\text{макс}} \approx \sqrt{\frac{f(h_{21э})}{30r_{б} C_{к}}}$$

где $f_{\text{макс}}$ – это наибольшая частота, при которой транзистор может работать (способен работать в схеме автогенератора).

10. Обратный ток коллекторного перехода при заданном обратном напряжении: $I_{кб0} = I_{к}$ при $I_{э}=0$, $U_{кб}<0$. О значении этого тока говорилось выше. Величина тока $I_{кб0}$ от μA до нескольких мА в зависимости от мощности и качества изготовления транзистора.

11. Максимально допустимый ток коллектора – $I_{к \text{ макс}}$.

12. Наибольшая допустимая мощность рассеяния коллектора:

$$P_{к \text{ макс}} = I_{к \text{ макс}} U_{кэ}.$$

13. Тепловое сопротивление между коллектором и корпусом:

$$R_{т} = \Delta T / P_{к \text{ макс}},$$

где ΔT – перепад (градиент) температур между коллектором и корпусом.

Следует помнить, что приведенные в справочных материалах параметры транзисторов определены для заданного диапазона их изменения, т.е. для определенных режимов работы и в заданном диапазоне температур. Поэтому для представления о том, как будут меняться параметры, в литературе [15, 18] приводятся обобщенные зависимости физических параметров от режима работы и от температуры. Вид этих зависимостей (например, для схемы ОЭ) представлен на рис. 2.14.

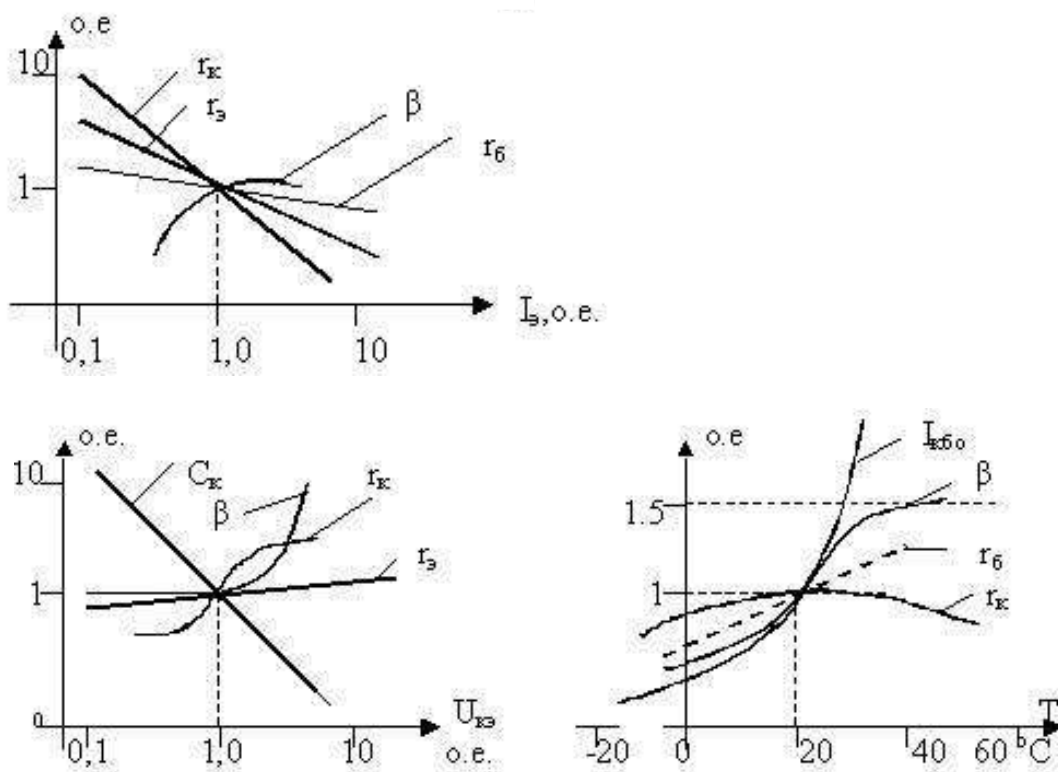


Рис. 2.14. Примерный вид обобщенных зависимостей физических параметров биполярных транзисторов от тока I_b (а), напряжения $U_{ке}$ (б) и температуры T (в)

Известно, что для Ge p - n -переходов максимально допустимая температура $80 \div 100$ °C, для $-150 \div 200$ °C.

2.7. Транзисторы с инжекционным питанием

Интересным развитием биполярных транзисторов являются полупроводниковые приборы с инжекционным питанием (предложены в 1971 году, используются в составе микросхем) [7, 9]. Благодаря особой конструкции, эти приборы обладают весьма полезными свойствами. В составе интегральных схем (их называют И²Л – элементы)

они позволяют получить высокую степень интеграции, так как для их действия требуется очень малая энергия переключения $\mathcal{E}_n = 10^{-12}$ Дж. Хорошо работают в диапазоне температур от -60 до $+125$ °C. Особенности являются: инверсный режим (по схеме), ключевой режим (по действию), небольшой логический уровень высокого и низкого напряжений $U^1 = (0,6 - 0,7)$ В, $U^0 = (0,1 - 0,2)$ В, наличие общего для групп четвертого электрода – инжектора, высокое

быстродействие ($t_{3\partial p} \approx 10$ нс). Упрощенная структура транзистора и УГО представлены на рис. 2.15.

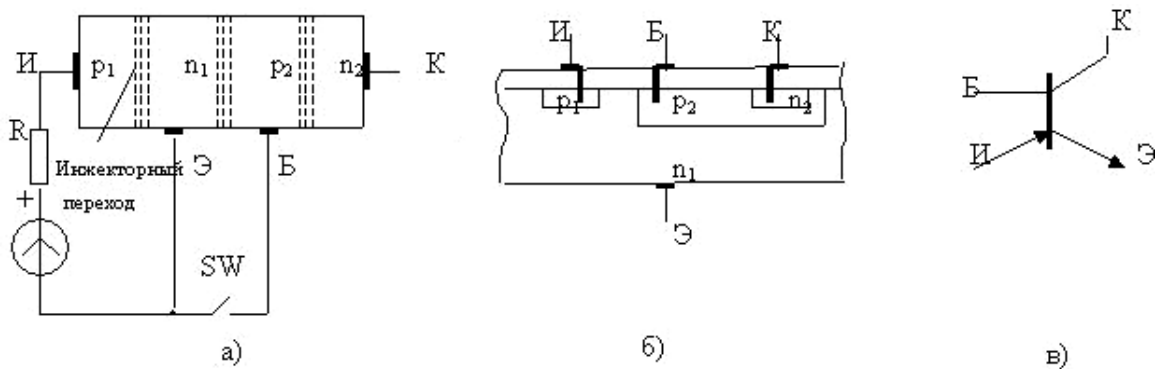


Рис. 2.15. И²Л-элемент: структуры (а), (б) и УГО (в):

И – инжектор, SW – ключ

Принцип действия И²Л-элемента: заряды инжектируются в область P_1 , область эмиттера обогащается, поэтому понижается барьер перехода n_1-p_2 , а следовательно и перехода p_2-n_2 . Между эмиттером и коллектором образуется малое сопротивление (возникает режим насыщения). Если эмиттер соединить с базой, замкнув ключ SW, то сопротивление перехода p_2-n_2 резко увеличивается (возникает режим отсечки). Роль ключа SW может выполнять такой же точно транзистор, а инжектор у них будет общим.

3. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, работа которого обусловлена током основных носителей зарядов, протекающим через проводящий канал, сопротивление которого модулируется (управляется) электрическим полем. Другое название – *униполярные* транзисторы – обусловлено тем, что ток в них создается носителями заряда одного знака (электронами или дырками). Полевые транзисторы имеют определенные преимущества перед биполярными транзисторами, такие как высокое входное сопротивление, малые мощности для управления, высокие частотные свойства, возможность работы при низких температурах, высокая технологичность изготовления.

Полевые транзисторы делятся на транзисторы с затвором в виде p – n -перехода (с управляющим p – n -переходом) и с изолированным затвором [со структурой металл – диэлектрик – полупроводник (МДП – транзисторы)], (другое название МОП-транзисторы).

3.1. Транзистор с управляющим p – n -переходом

Транзистор с управляющим p – n -переходом представляет собой пластину (участок) полупроводника p или n типа, от торцов которой сделаны отводы, называемые сток и исток, а вдоль пластины выполнен электрический переход (p – n -переход или барьер Шоттки), имеющий свой вывод, называемый затвором. На затвор подается такое по отношению к истоку напряжение, чтобы p – n -переход между затвором и кристаллом был смещен в обратном направлении (рис. 3.1).

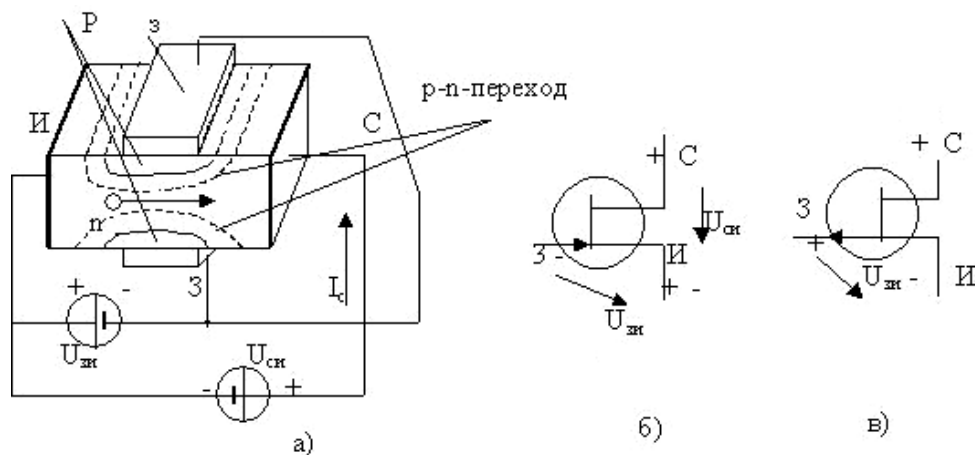


Рис. 3.1. Структура и УГО транзистора с управляющим p – n -переходом и каналом n -типа (а), (б); УГО транзистора с каналом p -типа (в)

Статические характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа представлены ниже на рис. 3.2.

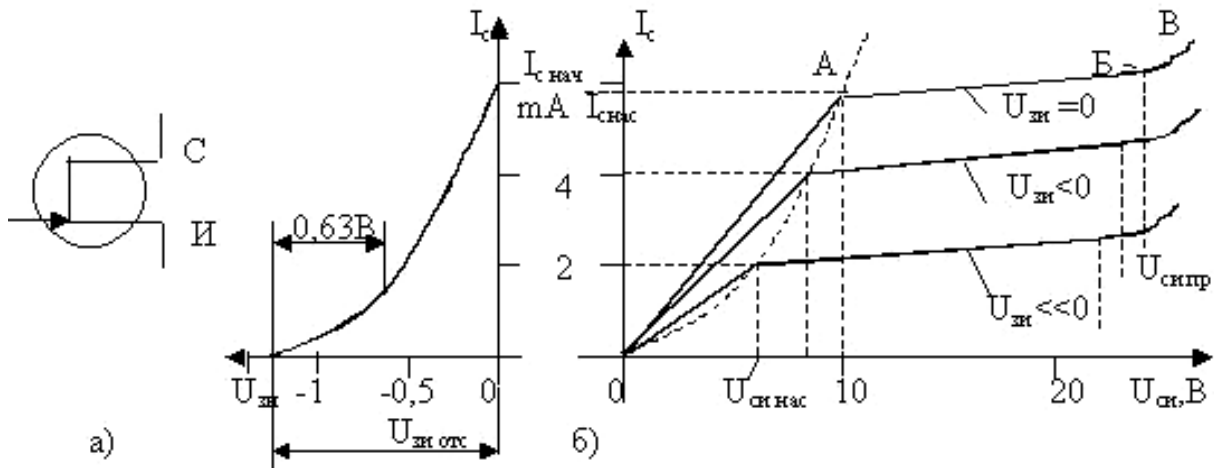


Рис. 3.2. Стоко-затворная (а) и выходные (б) статические характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа

Ток стока, при котором достигается значение тока насыщения, называется *начальным током стока* (обозначено $I_{c \text{ нач}}$). Напряжение $U_{си}$, при котором происходит насыщение канала, называется *напряжением насыщения* (обозначено $U_{си \text{ нас}}$). Напряжение $U_{зи}$, при котором ток стока $I_c = 0$, называется *напряжением отсечки* (обозначено $U_{зи \text{ отс}}$). Значения токов насыщения $I_{с \text{ нас}}$ и напряжений $U_{си \text{ нас}}$ зависят от значений $U_{зи}$, причем геометрическое место точек, соответствующих перекрытию канала и наступлению режима насыщения (пунктирная линия), образуют кривую, похожую на прямую ветвь ВАХ диода. С увеличением модуля $U_{зи}$ уменьшается пробивное напряжение между стоком и истоком $U_{си \text{ пр}}$, так как к p - n -переходу прикладывается сумма напряжений $U_{си} + U_{зи}$.

На выходных характеристиках имеются три участка: ОА, АБ, БВ. На участке ОА зависимость $I_c = f(U_{си})$ практически линейна и имеет большую крутизну. Участок АБ-область насыщения, участок БВ-область электрического пробоя. Участок ОА похож на ВАХ резистора, поэтому полевые транзисторы (ПТ) можно использовать как управляемое сопротивление. Участок АБ используется для усилительных режимов.

Основные параметры ПТ с управляющим p – n -переходом. Основными параметрами полевого транзистора являются:

1. Ток стока I_c в области насыщения выходных характеристик при неизменном значении U_{cu} определяется по аналитическому выражению стоко-затворной характеристики (3.1):

$$I_c = I_{c \text{ нач}} (1 - U_{zu} / U_{zu \text{ отс}})^2. \quad (3.1)$$

2. Крутизна характеристики S (оценка управляющего действия затвора):

$$S = dI_c / dU_{zu} \mid U_{cu} = \text{Const}. \quad (3.2)$$

Наибольшую крутизну характеристика (3.1) имеет в области $U_{zu}=0$, причем

$$S = S_{\text{нач}} (1 - U_{zu} / U_{zu \text{ отс}})^2, \quad S_{\text{нач}} = - (2 I_{c \text{ нач}} / U_{zu \text{ отс}}), \quad (3.3)$$

где $S \approx (0,3 - 3) \text{ мА/В}$.

3. Температурные свойства ПТ характеризуются семейством стоко-затворных характеристик при разных значениях температуры окружающей среды (рис. 3.3). По характеристикам видно, что ПТ с управляющим p – n -переходом имеет «термостабильную» точку Т.

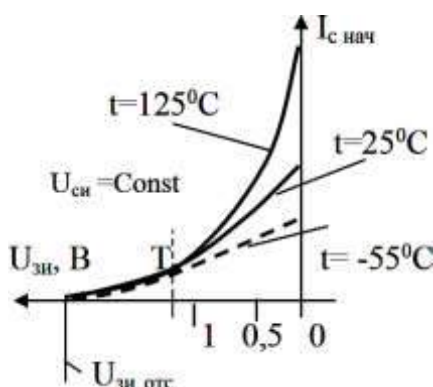


Рис. 3.3. Стоко-затворные характеристики ПТ при разных температурах

Наличие точки, в которой сходятся характеристики, снятые в широком диапазоне температур, свидетельствует о том, что параметры ПТ в этой точке мало зависят от температуры. Нужно заметить, что и крутизна характеристики в этой точке не велика.

4. Усилительные свойства ПТ помимо крутизны S характеризуются ещё коэффициентом усиления напряжения M , причем

$$M = dU_{cu} / dU_{zu} \mid I_c = \text{Const}. \quad (3.4)$$

5. Дифференциальное внутреннее сопротивление

$$R_{cu \text{ диф}} = dU_{cu} / dI_c \mid U_{zu} = \text{Const}, \quad (3.5)$$

$$R_{cu \text{ диф}} = (0,1 - 1) \text{ Мом}.$$

Учитывая (3.3), (3.4), (3.5), получим

$$M = S R_{cu \text{ диф}}. \quad (3.6)$$

6. Емкость p – n -перехода между затвором и каналом характеризуют двумя значениями: ёмкостью между затвором и истоком $C_{зи}$ и между затвором и стоком $C_{зс}$. Величина ёмкости составляет $(5 - 20) \text{ пФ}$.

7. Эквивалентные схемы ПТ с управляющим p – n -переходом разнообразны в зависимости от условий применения. Наиболее часто используются так называемые малосигнальные (для сигналов переменного тока) эквивалентные схемы, показанные на рис. 3.4.

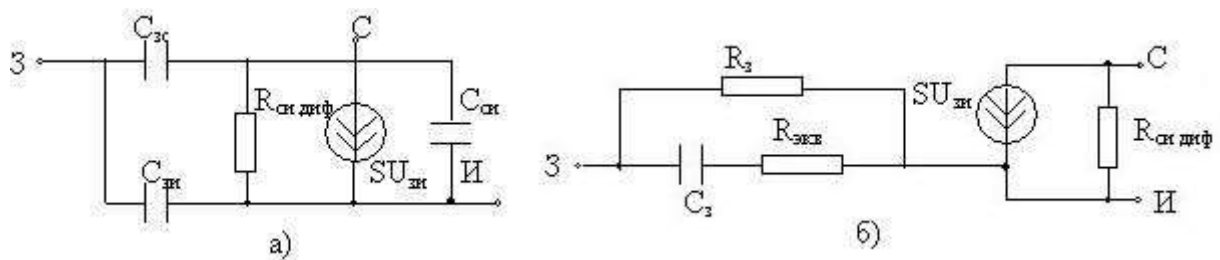


Рис. 3.4. Малосигнальные эквивалентные схемы ПТ:
исходная (а), преобразованная (б);

R_3 – омическое сопротивление затвора,

$R_{экв}$ – усредненное эквивалентное сопротивление,
через которое заряжается эквивалентная емкость затвора C_3

Ориентировочные значения для параметров ПТ с управляющим p – n -переходом [15]:

$$S = (0,3 - 3) \text{ мА/В}; \quad R_3 = 10^{10} \text{ Ом}; \quad R_{cu} = (0,1 - 1) \text{ мОм};$$

$$R_{экв} = (50 - 800) \text{ Ом}; \quad C_3 = (0,2 - 10) \text{ пФ}.$$

Изменение параметров и характеристик ПТ с изменением температуры обусловлено изменением:

- обратного тока p – n -перехода;
- контактной разности потенциалов;
- удельного сопротивления канала.

Особое свойство ПТ с управляющим p – n -переходом – наличие термостабильной точки (рис. 3.3). Это свойство обусловлено тем, что с ростом температуры удельное сопротивление канала увеличивается, вызывая уменьшение тока стока. Это дает возможность правильным выбором режимов взаимно компенсировать изменения тока стока, вызванные изменением контактной разности потенциалов и удельного сопротивления канала. При этом можно добиться, чтобы ток I_c оставался неизменным в широком диапазоне изменения темпе-

ратур (рис. 3.3). Это объясняется тем, что контактная разность потенциалов с увеличением температуры уменьшается приблизительно на 2,2 мВ/град, что должно (при неизменном $U_{зи}$) приводить к увеличению тока стока. Увеличение удельного сопротивления канала должно приводить к уменьшению этого тока. Ориентировочное положение термостабильной точки на стоко-затворной характеристике определяется значением: $|U_{зи\text{ т}}| = |U_{зи\text{ отс}}| - 0,63\text{ В}$. Недостаток этого режима – малая крутизна характеристик.

3.2. МДП (МОП)-транзисторы

МДП-транзисторы (полевые транзисторы с изолированным затвором) могут быть двух видов:

- а) с индуцированным каналом (канал возникает под действием напряжения, приложенного к управляющим электродам);
- б) со встроенным каналом (канал создается при изготовлении).

У МДП-транзистора, в отличие от ПТ с управляющим p – n -переходом, металлический затвор изолирован от полупроводника слоем диэлектрика и имеется дополнительный вывод П (рис. 3.5) от кристалла, называемый подложкой.

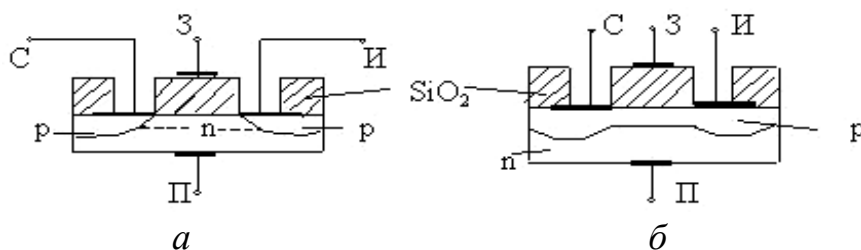


Рис. 3.5. Схематическая структура МОП транзисторов с индуцированным каналом (а) и со встроенным каналом (б), (каналы p -типа)

МДП-транзистор с индуцированным каналом p -типа устроен следующим образом. Основа – пластина слаболегированного кремния n -типа называется подложкой (вывод П на рис. 3.5). В теле подложки созданы две сильно легированные области с полупроводником p -типа. Одна из них – сток (С), другая – исток (И). Электрод затвора З изолирован от областей тонким слоем диэлектрика SiO_2 толщиной (0,2 – 0,3) мкм.

Вследствие физических явлений, возникающих на границе раздела диэлектрика SiO_2 с полупроводником n -типа, в подложке индуцируется обогащенный электронами поверхностный слой (рис. 3.6).

Между p -областями стока и истока будет располагаться слой отрицательных зарядов, образуя структуру p – n – p на пути от истока к стоку.

В месте контакта двуокиси кремния и полупроводника образуется контактная разность потенциалов, достигающая значения (1,4 – 2,4) В.

p -области с подложкой n -типа образуют p – n -переходы. К стоку и истоку прикладываются противоположные по знаку потенциалы, поэтому при любой полярности приложенного к электродам стока и истока напряжения один из p – n -переходов будет смещен в обратном направлении и препятствует протеканию тока. Следовательно, в данном приборе в исходном состоянии между стоком и истоком отсутствует тоководящий канал. Проводящий канал возникает при достижении напряжением на затворе некоторого порогового значения $U_{зи\ пор}$ при $U_{си} \neq 0$, $|U_{зи\ пор}| \approx (2 - 4)$ В.

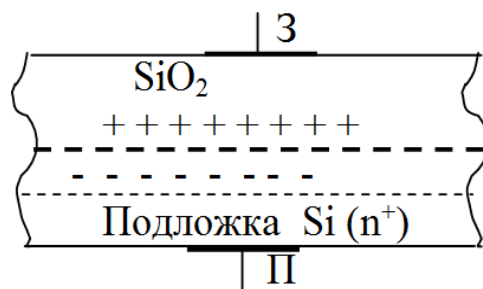


Рис. 3.6. Исходное распределение зарядов на границе раздела двуокиси кремния и полупроводника

При увеличении (в данном случае отрицательного относительно истока) напряжения на затворе выше порогового значения в подложке на границе раздела образуется слой зарядов с электропроводностью p -типа. Этот слой соединяет p -области стока и истока, образуя токопроводящий (индуцированный) канал. Чем больше значение отрицательного напряжения на затворе, тем больше толщина индуцированного канала и его проводимость. Таким образом, рассматриваемая структура обладает признаками управляемого ключевого элемента. Если на затворе установлен положительный или нулевой потенциал, ток между стоком и истоком протекать не может (цепь «разомкнута», т.е. имеет очень большое сопротивление). Если же на затворе установить отрицательный потенциал, по модулю больший $U_{зи\ пор}$, в цепи сток – исток может протекать ток, зависящий от управляющего напряжения $U_{зи}$ и напряжения питания $U_{си}$ (рис. 3.7, в).

Стоко-затворную характеристику часто называют характеристикой управления, так как от величины и знака напряжения на затворе относительно истока $U_{зи}$ зависит величина тока стока I_c .

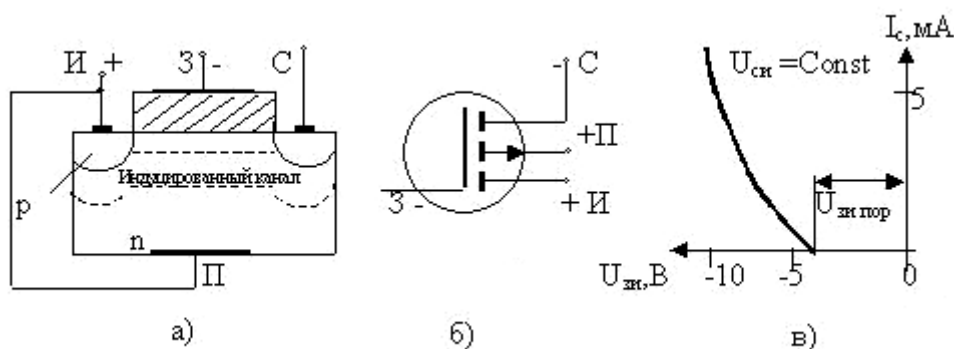


Рис. 3.7. Иллюстрация образования токопроводящего канала (а), условное графическое обозначение (б) и стоко-затворная характеристика (в) МДП-транзистора с индуцированным каналом p -типа

Статические стоковые (выходные) характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом p -типа (рис. 3.8) по виду похожи на таковые для транзистора с управляющим p – n -переходом и каналом n -типа (рис. 3.2, б).

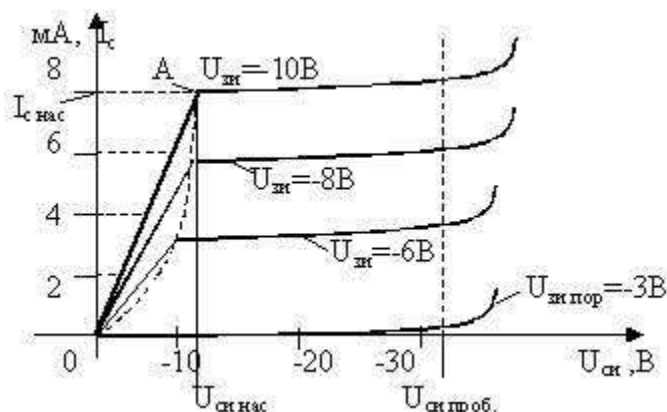


Рис. 3.8. Упрощённые стоковые характеристики МДП-транзистора с индуцированным p -каналом (электрические величины ориентировочные)

При $|U_{зи}| < |U_{зи пор}|$ ток очень мал (доли μA), поэтому до пробивного напряжения $U_{си проб}$ величина тока I_c практически незаметна. Если $|U_{зи}|$ превышает $|U_{зи пор}|$, то при малых значениях $|U_{си}|$ ток стока изменяется вначале прямо пропорционально изменению $U_{си}$ (участок ОА). Затем из-за сужения канала и уменьшения его общей проводимости рост тока I_c уменьшается. В точке А ток достигает значения тока на-

сыщения, соответствующего значению $U_{зи}$ для данной характеристики. Ток стока можно представить состоящим из двух составляющих:

$$I_c = I_k + I_{c\text{ ост}},$$

где I_k – ток канала (управляемая часть);

$I_{c\text{ ост}}$ – остаточный ток стока (это ток утечки плюс обратный ток неосновных носителей), $I_{c\text{ ост}} \approx 0$.

В точке А (рис. 3.8) управляемая часть тока уже не растет (достигнут режим насыщения), поэтому при дальнейшем увеличении $U_{си}$ ток стока остается неизменным, равным насыщенному значению $I_{c\text{ нас}}$. При увеличении напряжения $U_{си}$ до значения $U_{си\text{ проб}}$ возникает электрический пробой стокового p – n -перехода, ток стока резко увеличивается, замыкаясь через цепь подложки (подложку обычно соединяют с истоком отдельным проводником). Если увеличивать значение $|U_{зи}|$ при неизменном $U_{си}$, то за счет увеличения электропроводности канала стоковая характеристика поднимется вверх, а значения $|U_{си\text{ на}}|$ и $I_{c\text{ нас}}$ станут больше.

Следует отметить, что практически пропорциональная зависимость тока стока I_c от напряжения $U_{си}$ при заданном значении управляющего напряжения $U_{зи}$ на участках ОА стоковых характеристик (рис. 3.8) позволяет построить «переменный резистор» с управляемой вольт-амперной характеристикой. Управление таким элементом может осуществляться либо простым изменением потенциала на затворе при заданном значении напряжения сток – исток, либо изменением обоих напряжений. Несмотря на малый возможный диапазон изменения этих напряжений данные свойства полевого транзистора существенно расширяют возможности их использования в различных устройствах.

В МОП-транзисторах с индуцированным каналом может также использоваться подложка p -типа, в которой будет индуцироваться канал n -типа (рис. 3.9).

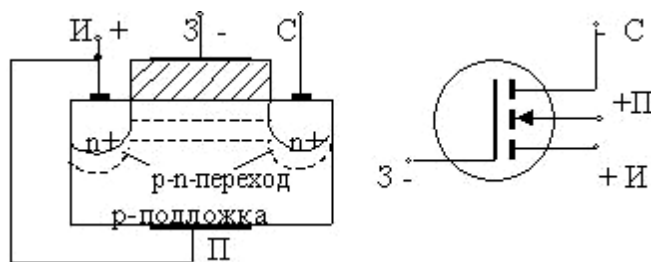


Рис. 3.9. Структура и УГО полевого транзистора с индуцируемым каналом n -типа

В исходном состоянии структуры вследствие контактных явлений на границе раздела диэлектрика SiO_2 с полупроводником подложки образуется слой зарядов с электропроводностью n -типа, т.е. высоколегированные n -области уже соединены начальным каналом n -типа, который будет обладать при $U_{зи}=0$ некоторой проводимостью. В таком канале путь для тока от истока к стоку уже открыт при $U_{зи}=0$.

Если $U_{зи}<0$, а исток соединен с подложкой, то отрицательное напряжение на затворе будет способствовать обеднению слоя, образующего проводящий канал n -типа. При некотором значении $U_{зи\text{ пор}}<0$ канал ликвидируется вовсе. Учитывая сказанное, статические характеристики МОП-транзистора с индуцируемым каналом n -типа будут отличаться от таковых для транзистора с индуцируемым каналом p -типа. Основные отличия: стоко-затворная характеристика может пересекать ось тока стока, так как ток стока имеет не нулевое значение при отсутствии управляющего напряжения $U_{зи}$; управляющее напряжение может быть отрицательным, положительным либо нулевым.

Анализируя стоко-затворные характеристики транзистора с индуцируемым каналом n -типа (рис. 3.10, а), можно видеть, что этот транзистор также обладает свойствами управляемого ключевого элемента как и транзистор с индуцируемым каналом p -типа.

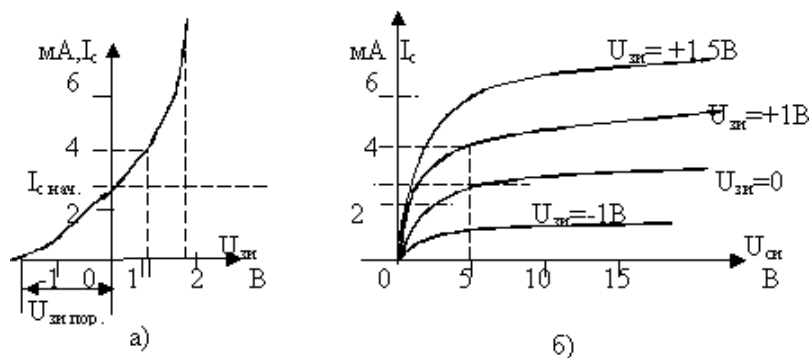


Рис. 3.10. Примерный вид характеристики управления (а) и выходных характеристик МОП-транзистора с индуцированным каналом n -типа (б)

Отмеченные выше две характерные особенности МОП-транзистора с индуцируемым каналом n -типа позволяют существенно расширить область их использования в электронных устройствах.

3.3. МДП-транзисторы со встроенным каналом

МДП-транзисторы со встроенным каналом могут быть с каналом n или p -типа. Условное изображение таких транзисторов показано на

рис. 3.11. Статические характеристики МОП-транзистора со встроенным каналом n -типа качественно не отличаются от статических характеристик МОП-транзистора с индуцируемым каналом n -типа. Это же справедливо и для МДП-транзисторов со встроенным каналом p -типа.

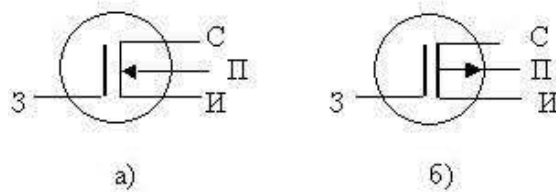


Рис. 3.11. УГО полевых транзисторов со встроенным каналом: канал n -типа (а), канал p -типа (б)

У транзисторов со встроенным каналом можно получить относительно большие токи – это их преимущество.

У всех МДП-транзисторов потенциал подложки относительно истока оказывает влияние на характеристики транзистора.

Если на подложку подается потенциал относительно истока, то напряжение между подложкой и истоком должно иметь такую полярность, чтобы p – n -переход «исток – подложка» был смещен в обратном направлении.

С увеличением напряжения между подложкой и истоком (U_{ni}) уменьшается действие управляющего напряжения $U_{зи}$, т.е. при том же $U_{зи}$ ток стока I_c становится меньше (рис. 3.12). Это отражается на положении стоко-затворной характеристики: с ростом напряжения U_{ni} она смещается влево, увеличивая пороговое напряжение открытия транзистора. Возможность изменения состояния МОП-транзистора с помощью дополнительного напряжения, подаваемого на подложку, расширяет функциональные возможности этого прибора.

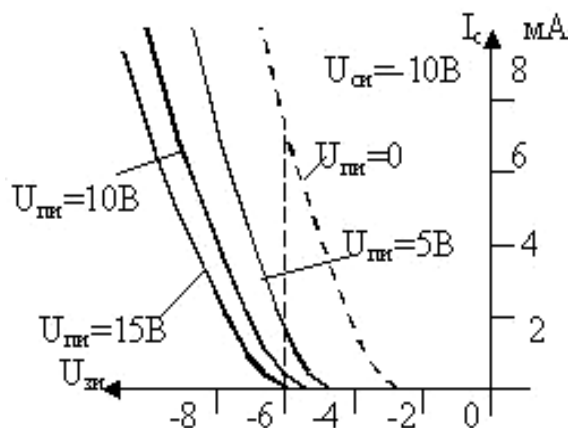


Рис. 3.12. Иллюстрация влияния напряжения U_{ni} на характеристики управления МДП-транзистора с индуцируемым каналом p -типа

3.4. Способы включения полевых транзисторов

Способы включения полевых транзисторов (ПТ) в электрическую схему на примере полевого транзистора с управляющим p – n -переходом и каналом p -типа показаны на рис. 3.13.

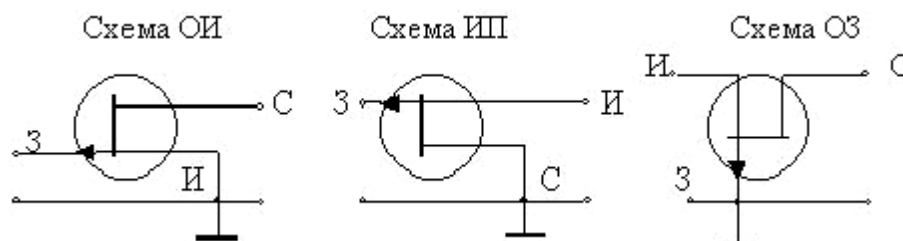


Рис. 3.13. Схемы включения полевых транзисторов: с общим истоком (ОИ), с общим стоком (ОС) – истоковый повторитель (ИП), с общим затвором (ОЗ)

3.5. Полевой транзистор как четырехполюсник

В расчетах схем с полевыми транзисторами также используют параметры четырехполюсника: при малых сигналах наиболее удобна система g -параметров (рис. 3.14).

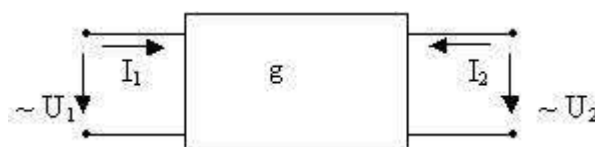


Рис. 3.14. Четырехполюсник – расчётный эквивалент полевого транзистора

Система уравнений, соответствующая четырехполюснику, имеет вид:

$$I_{1\sim} = g_{11} U_{1\sim} + g_{12} U_{2\sim}; \quad I_2 = g_{21} U_{1\sim} + g_{22} U_{2\sim}. \quad (3.7)$$

Коэффициенты данной системы имеют размерности проводимостей и являются универсальными параметрами, которые для каждой из схем включения ПТ имеют свои значения.

Для схемы ОИ:

g_{11} – входная проводимость при $U_{2\sim} = 0$;

g_{12} – проводимость обратной передачи при $U_{1\sim} = 0$;

g_{21} – проводимость прямой передачи при $U_{2\sim} = 0$;

g_{22} – выходная проводимость при $U_{1\sim} = 0$.

Следует заметить, что режимы $U_{1\sim} = 0$, $U_{2\sim} = 0$ достигаются не коротким замыканием выводов, а включением емкостей (достаточно больших), представляющих малое сопротивление для переменных составляющих. На высоких частотах g -параметры переходят в y -параметры, где $y = g + j\omega C$, а ёмкость C определяется по эквивалентной схеме.

3.6. МДП-структуры специального назначения

Структура МНОП (металл – нитрид – оксид – полупроводник) – это составная часть микросхем памяти (рис. 3.15).

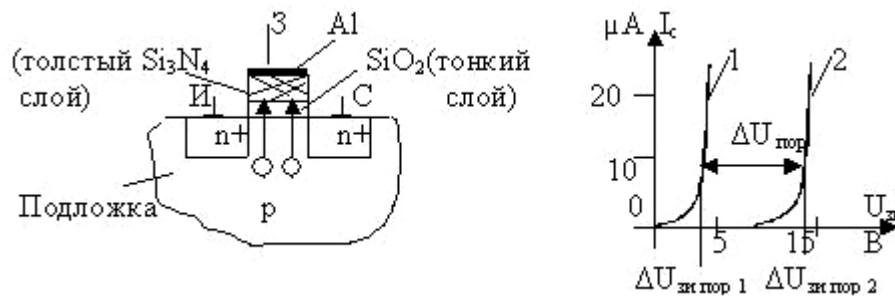


Рис. 3.15. Структура МНОП и характеристики управления до (1) и после (2) программирования ($\Delta U_{пор}$ – межпороговая зона)

В структуре МНОП диэлектрик двухслойный. Если на затвор подать $+(28 \div 30)$ В, то электроны из подложки туннелируют в толстый слой Si_3N_4 , где образуют область неподвижных отрицательных ионов. Их заряд повышает пороговое напряжение (кривая 2, рис. 3.15) и может храниться долго (несколько лет) при отключении всех напряжений.

Если подать отрицательное напряжение, заряд рассасывается, пороговое напряжение уменьшается (кривая 1, рис. 3.15). «Записывая» заряд, мы изменяем сопротивление, которое будет проявляться при пороге $U_{зи} \approx (3 \div 5)$ В. На МНОП структурах выполняют запоминающие элементы, которые будут иметь то или иное сопротивление между стоком и истоком. Другим видом структур специального назначения являются приборы с зарядовой связью.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) относятся к приборам с переносом заряда [9]. Упрощенная структура такого прибора представлена на рис. 3.16.

Конструктивно ПЗС можно представить цепочкой МОП-транзисторов на общем кристалле p -типа. Каждый транзистор – своеобразный конденсатор. Размеры электродов – 10 мкм, промежутки между ними (2 – 4) мкм, толщина диэлектрика 0,1 мкм (рис. 3.16).

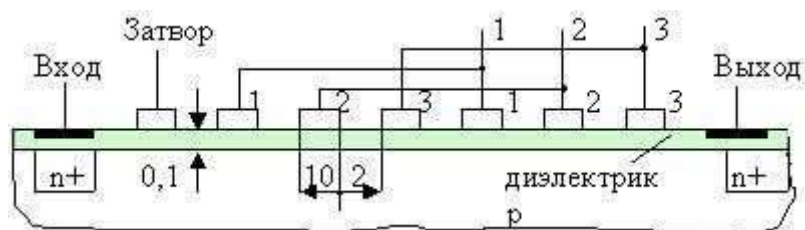


Рис. 3.16. Схематическая структура ПЗС

Характерны два режима работы:

- 1) хранение информации в виде заряда в одном или нескольких конденсаторах;
- 2) перенос заряда из одного конденсатора вдоль цепочки в следующий: (наличие заряда = «1», отсутствие = «0» в цифровой форме), изменение величины заряда – в аналоговой форме.

МОП-транзисторы с плавающим затвором (с лавинной инжекцией заряда) (ЛИЗМОП). В структуре ЛИЗМОП (рис. 3.17) при подаче напряжения на сток или исток (относительно подложки) возникает лавинный пробой p – n -перехода между p -областью и подложкой. Электроны с повышенной энергией проникают в изолирующий слой и достигают области затвора, образуя там отрицательный заряд, который может храниться несколько лет. Наличие этого заряда вызывает появление проводящего канала, соединяющего сток и исток, т.е. транзистор становится проводящим. Чтобы транзистор стал непроводящим, надо убрать заряд. Делают это путем облучения кварцевыми лампами через специальные окна из кварцевого стекла. Такая структура используется для создания запоминающих ячеек в микросхемах памяти запоминающих устройств цифровых схем. Металлический вывод от затвора в таких структурах не нужен.

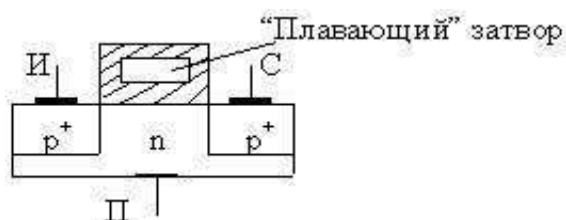


Рис. 3.17. Структура запоминающей ячейки ЛИЗМОП

Полевые транзисторы с двумя затворами (тетродные). Наличие второго затвора позволяет одновременно управлять током транзистора с помощью двух управляющих напряжений, что используется для построения различных функциональных схем, например множительных устройств (рис. 3.18).

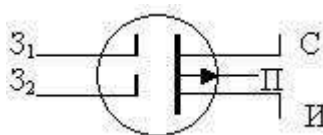


Рис. 3.18. Изображение ПТ с двумя затворами (МОП-транзистор со встроенным каналом p -типа)

Для ПТ с двумя затворами указывают крутизну характеристики по первому и второму затворам, напряжение отсечки первого и второго затвора. Остальное – как для однозатворного.

3.7. Нанотранзисторы

Проблемы микроминиатюризации. Планарная групповая технология производства ИС добилась впечатляющих успехов в миниатюризации полупроводниковых элементов, в частности транзисторов, размещенных на одном чипе.

Физические законы, лежащие в основе работы транзисторов, устанавливают свои пределы на размеры элементов, а технология требует новых подходов и процессов. Одной из основных проблем при переходе к наноразмерам транзисторов является проблема межсоединений [23]. С уменьшением геометрических параметров линий межсоединений на кристалле возрастают плотность тока и сопротивление, что вызывает разогрев этих линий, изменение их геометрии, причем при плотности тока $\sim 10^5$ А/см² и температуре 210 °С токоведущие дорожки выходят из строя. Время работы межсоединений существенно уменьшается, а надёжность работы чипа резко падает.

С увеличением частоты сигналов линии межсоединений становятся волноводными линиями. Оценки показывают, что начиная с частот 10^{11} Гц задержки сигнала, обусловленные волновыми свойствами, становятся сравнимыми со временем переключения транзисторов ($t_{\text{П}} \approx 10^{-11}$ с).

В наноструктурах используются квантовые эффекты токопереноса, не характерные для обычного токопереноса по проводным линиям, поэтому обычные металлические дорожки теряют свое предназначение, а для межсоединений должны быть разработаны нанопроводники [23].

В настоящее время элементной базой микроэлектроники являются микроэлектронные транзисторы. Основной кремниевой транзисторной структурой в микроэлектронике является кремниевая МДП-структура.

Сейчас достигнуты длина канала и затвора около 100 нм, толщина подзатворного слоя (SiO_2) составляет 0,8 нм (три атомных слоя). Это позволило увеличить быстродействие, но обостряет следующие проблемы: возрастают токи утечек, увеличиваются сопротивления областей сток-исток (увеличивается плотность выделяемой в структуре мощности, растет напряжение переключения). С увеличением напряжения возрастает опасность пробоя подзатворного слоя. Уменьшение длины канала требует увеличения степени легирования в канале до 10^{18} см^{-3} , а это приводит к снижению подвижности носителей заряда и росту порога включения транзистора [23].

Сейчас ведутся разработки транзисторных структур для субмикронной технологии: на 0,13; 0,10; 0,07 мкм, а технология нанометрового диапазона станет промышленной предположительно на ближайшие 50 лет [23].

Некоторые виды транзисторов субмикронной технологии. Проблему масштабирования параметров транзисторов пока предлагается решать в следующих направлениях [23]:

1. *КНИ-транзисторы* (кремний на изоляторе с ультратонким основанием) (UTB-Ultrathin Body):

- а) приборы с управляемой проводимостью канала;
- б) транзисторы с двойным затвором;
- в) плавникоподобный полевой транзистор (FinFET);
- г) одноэлектронные транзисторы.

КНИ транзистор имеет обедненное носителями заряда основание, поэтому в инверсионном слое электрическое поле слабее, следовательно, мощность управления требуется малая.

Фирма Intel создала транзистор TeraHertz (рис. 3.19), в котором основание обеднено полностью, толщина основания 30 нм, за счет этого достигнуто высокое быстродействие и низкая потребляемая мощность.

При напряжении 1,3 В, ток стока достигает 650 мкА, а ток утечки составляет 9 нА.

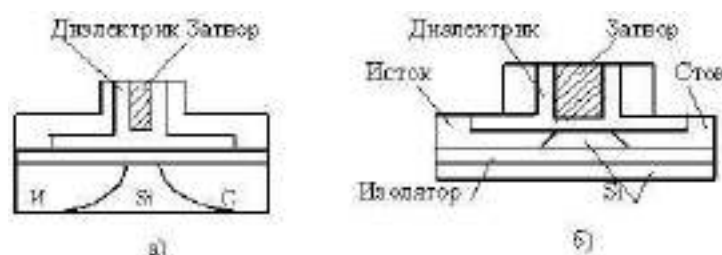


Рис. 3.19. Структуры обычного (а) и TeraHertz (б) транзисторов

Стоко-затворные характеристики КНИ-транзистора показаны на рис. 3.20.

Недостатки КНИ-структур: короткий канал трудно управляется напряжением затвора, требуется высокая степень легирования области истока. Эти недостатки можно частично устранить в транзисторах с двойным затвором.

Конструкция такого транзистора имеет вид пластины (плавника), обернутой затворной областью. Эти транзисторы получили название FinFET-транзисторы (fin – плавник).

Каналы индуцируются напряжением на затворах вдоль обеих сторон пластины.

Трехмерная структура позволяет значительно снизить потери на тепловыделение, ток увеличивается в два раза. Тело транзистора (плавник) имеет толщину 20 нм и высоту 180 нм.

Пороговое напряжение 0,15 В. Затворов может быть два или три (рис. 3.21).

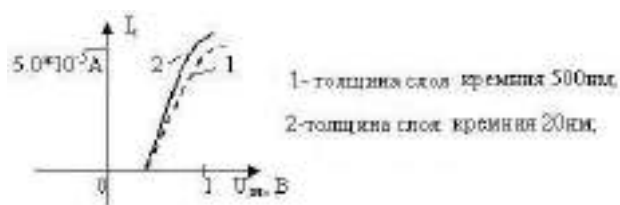


Рис. 3.20. Примерные стоко-затворные характеристики КНИ-транзистора

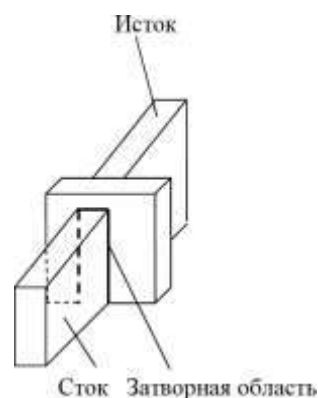


Рис. 3.21. Конструктивная схема нанотранзистора с тремя затворами

2. *Гетеротранзисторы* (HEMT-транзисторы) (High Electron Mobility Transistor) – это гетероструктурные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов.

Наиболее популярным активным элементом такого типа (на гетероструктурах) является *n*-канальный полевой транзистор с затвором Шоттки на арсеинд-галлиевой (GaAs) структуре (MESFET). Транзисторы этого типа имеют длину канала $\approx 0,13$ мкм и работают на частоте 50 ГГц.

На основе гетеропереходных ПТ с затвором Шоттки (ГПТШ) созданы СВЧ-транзисторы на переходах AlGaN-GaN.

Структура ГПТШ на основе GaN показана на рис. 3.22.

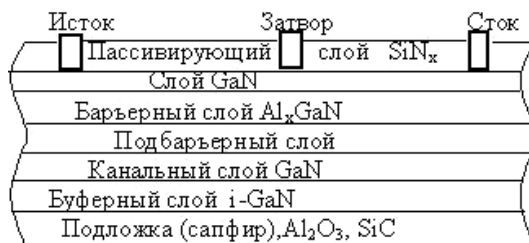


Рис. 3.22. Структура транзистора на гетеропереходах

3. *Нанотранзисторы на основе углеродных нанотрубок.* Эти транзисторы имеют меньшие размеры и меньшее потребление по сравнению с другими нанотранзисторами. Углеродная нанотрубка по диаметру меньше толщины человеческого волоса в $10^4 - 10^5$ раз.

Транзистор формируется на кремниевой подложке, покрытой слоем окисла SiO_2 (рис. 3.23, а). В Московском институте электронной техники (МИЭТ) проведены исследования макетных образцов нанотранзисторов на основе углеродных трубок [23]. Стокозатворная характеристика транзистора напоминает классическую характеристику МОП транзистора со встроенным каналом *p*-типа (рис. 3.23, б).

Отмечено, что создание нанотранзисторов на основе единичной нанотрубки является весьма трудоёмким процессом.

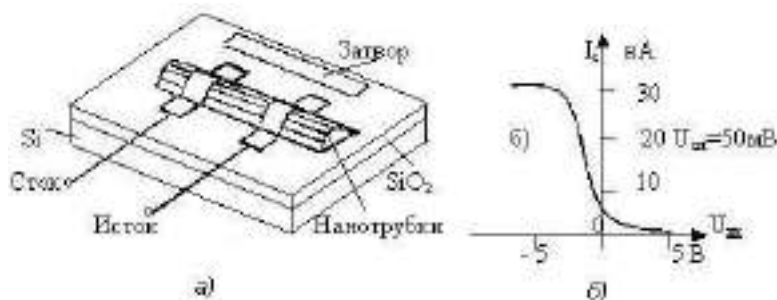


Рис. 3.23. Структурная схема нанотранзистора на углеродных нанотрубках (а) и его стоко-затворная характеристика (б)

Транзисторы на основе углеродных нанотрубок считаются перспективными для работы в условиях высоких температур.

4. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Приборы, имеющие на вольтамперной характеристике участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС), позволяют выполнить устройства, обладающие особыми свойствами и характеристиками. К таким приборам относятся: туннельные диоды, однопереходные транзисторы (двухбазовые диоды), тиристоры и диносторы.

4.1. Туннельный и обращенный диоды

Туннельный диод (ТД) – это диод, на ВАХ которого имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. В зависимости от назначения туннельные диоды разделяют на: усилительные (ЗИ 101, ЗИ 104); генераторные (ЗИ 201, ЗИ 203); переключающие (ЗИ 306 – ЗИ 309) [13].

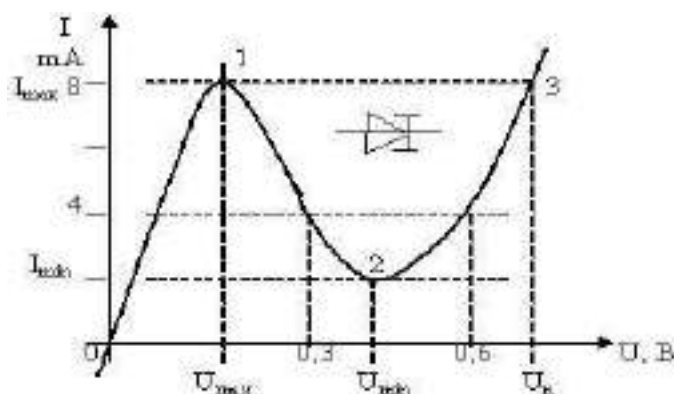


Рис. 4.1. ВАХ туннельного диода

Туннельный диод имеет один p^+-n^+ -переход, но по сравнению с обычными диодами отличается высокой концентрацией примесей. Из-за этого обедненный слой, образующийся в месте $p-n$ -перехода, оказывается очень тонким. Это приводит к появлению так называемого туннельного эффекта, когда носители зарядов (электроны

и дырки), имеющие меньшую энергию, чем высота потенциального барьера, могут проникать сквозь этот барьер (туннелировать) вследствие волновых свойств частиц [25].

На участке 0 – 1 (рис. 4.1), где действует туннельный механизм переноса носителей заряда (вся область отрицательных и начальный участок положительных напряжений, приложенных к диоду), сопротивление диода мало. С увеличением положительного напряжения до значения $U_{\text{макс}}$ туннельный ток диода растет (участок 0 – 1) до значения $I_{\text{макс}}$, а затем снижается. При напряжении $U_{\text{мин}}$, соответствующем току $I_{\text{мин}}$, туннельный эффект прекращается. С дальнейшим ростом напряжения начинает проявляться инжекция носителей тока через прямо смещенный p – n -переход, потенциальный барьер перехода снижается, увеличивается прямой ток, обусловленный диффузией зарядов.

Наклон падающего участка ВАХ (участок 1 – 2 на рис. 4.1) определяет величину дифференциального отрицательного сопротивления диода: $R_d = \Delta U / \Delta I$, R_d составляет (десятки – сотни) Ом.

Наличие отрицательного сопротивления позволяет использовать ТД для генерации колебаний и в переключательных схемах. Напряжение переключения $U_{\text{перекл}} = U_n - U_{\text{макс}}$, где U_n – напряжение питания.

Так как туннельный механизм переноса зарядов не связан с процессами диффузии носителей заряда, то ТД могут работать на очень высоких частотах (сотни МГц – ГГц) и в широком диапазоне температур (от 4,2 до 620 К). ТД изготавливают из Si, Ga, AsGa.

Обращенный диод является разновидностью ТД, однако в нем вместо участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ имеется практически горизонтальный участок. Диод можно использовать для выпрямления малых напряжений, если использовать обратную ветвь ВАХ (рис. 4.2).

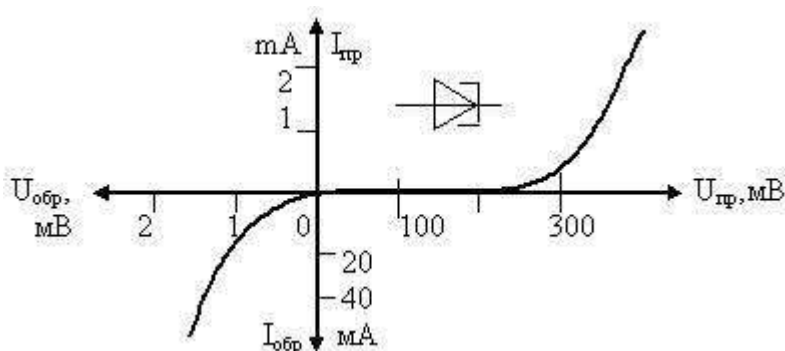


Рис. 4.2. ВАХ обращённого диода

4.2. Двухбазовый диод (однопереходный транзистор)

Двухбазовый диод – это трёхэлектродный полупроводниковый прибор, содержащий один электронно-дырочный переход (эмиттерный) и два вывода от базовой области (b_1 и b_2 рис. 4.3).

База выполнена из полупроводника одного типа проводимости, а эмиттер – из другого. При межбазовом напряжении $U_{mb} = 0$ ВАХ $i_1 = f(U_1)$ представляет собой обычную ВАХ p – n -перехода. При $U_{mb} > 0$ ток i_2 создает внутри кристалла (базы) на участке Э – b_1 падение напряжения $U_{вн}$, которое является запирающим для p – n -перехода. Поэтому при $U_{вн} > U_1$ переход закрыт, через него, как обычно, течет малый обратный ток ($i_1 = -I_{10}$). При $U_1 \geq U_{вн}$ (точка 1, на рис. 4.3, в) переход открывается, в базу из эмиттера инжектируются неосновные носители, сопротивление участка базы Э – b_1 резко падает.

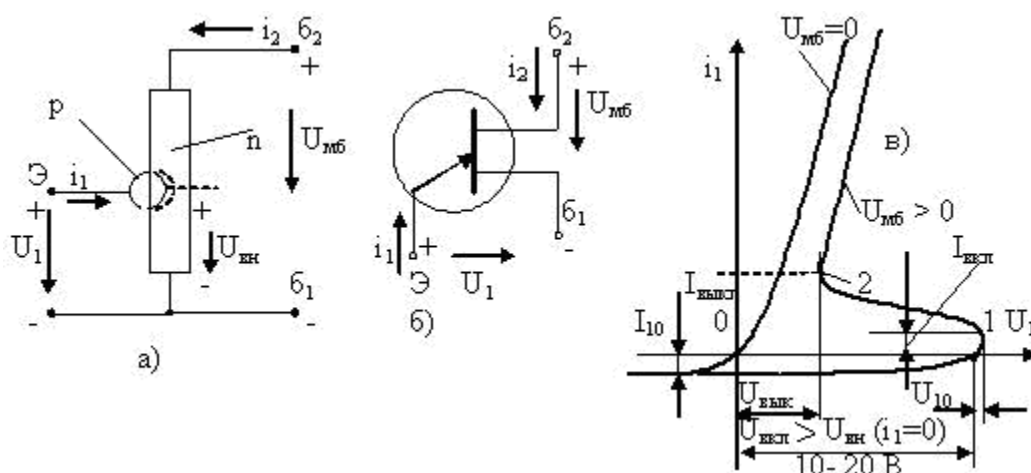


Рис. 4.3. Структура (а), УГО (б) и ВАХ (в) двухбазового диода с n -базой

С уменьшением сопротивления перехода эмиттер-база 1 уменьшается запирающее напряжение $U_{вн}$, ток i_1 увеличивается, еще более открывая p – n -переход ($dU_1 / di_1 < 0$) – развивается лавинообразный процесс, заканчивающийся полным открытием перехода (точка 2), после чего ВАХ выходит на прямую ветвь характеристики p – n -перехода. Напряжение включения:

$$U_{вкл} = U_{вн} (i_1=0) + U_{10} \approx U_{вн} (i_1=0) = U_{mb} (R_{b1}/R_{mb}) = U_{mb} \cdot \eta_R, \quad (4.1)$$

где $R_{мб}$, $R_{б1}$ – сопротивление кристалла соответственно между $б_1$, $б_2$ и $Э - б_1$;

U_{10} – начальное напряжение открытого перехода, $U_{10} \ll U_{вкл}$;

$\eta_R = U_{вн (i1=0)} / U_{мб} \approx R_{б1} / (R_{б1} + R_{б2})$ – внутренний параметр (коэффициент передачи напряжения).

Диоды КТ 117А-Г имеют: $\eta_R = 0,5 - 0,9$; $R_{мб} = (4 - 12) \text{ кОм}$;

$I_{вкл} \leq 20 \text{ мкА}$; $I_{э \text{ max}} \leq 50 \text{ мА}$; $I_{выкл} \geq 1 \text{ мА}$; $U_{мб} \leq 30 \text{ В}$;

$f_{ген \cdot макс} \leq 200 \text{ кГц}$; $U_{остаточное э-б} \leq 5 \text{ В}$.

Существуют однопереходные транзисторы (двухбазовые диоды) с базой из полупроводника p -типа и эмиттером n -типа. ВАХ такого диода аналогичны рассмотренным, но направления токов и напряжений изменяются на обратные, а стрелка на эмиттере в УГО направлена от базы. Есть безкорпусные двухбазовые диоды КТ 119 А, Б, которые используются в схемах генерации и в релейных элементах [15]. Из двух биполярных транзисторов можно создать аналог двухбазового диода, схема которого приведена на рис. 4.4.

Падение напряжения на резисторе $R_{б1}$ играет роль внутреннего напряжения. Транзисторы VT_1 и VT_2 закрыты при $U_1 < [E \cdot R_{б1} / (R_{б1} + R_{б2})] = U_{Rб1}$.

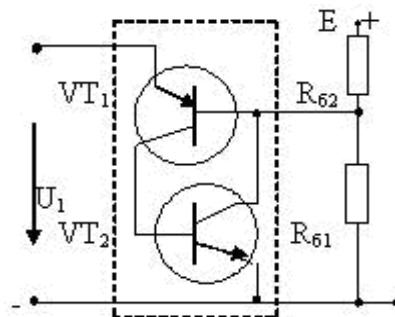


Рис. 4.4. Схема аналога двухбазового диода

Если $U_1 \geq U_{Rб1}$ транзисторы открываются, причём остаточное падение напряжения на открытых транзисторах будет значительно меньше, чем в схеме двухбазового диода.

Преимуществом аналога над оригиналом является малое остаточное напряжение на открытом выходе. Второе преимущество – изменением $R_{б1}$, $R_{б2}$ легко регулировать $U_{вкл}$ прибора.

4.3. Лавинный транзистор

Лавинными транзисторами называют транзисторы, в которых эффект ударной ионизации в p – n -переходе используется для повышения коэффициента передачи тока α . По структуре и основным свойствам лавинный транзистор не отличается от обычных плоскостных транзисторов, однако он работает в такой области характеристик, которая не свойственна усилительному режиму обычного транзистора.

Интегральный коэффициент передачи эмиттерного тока в лавинном транзисторе при наличии ударной ионизации выражается формулой:

$$\alpha_m = M \cdot \alpha \approx 1,$$

где M – коэффициент ударной ионизации.

Известно, что ударная ионизация происходит, когда напряженность электрического поля, вызванная обратным смещением, достаточно велика, и неосновные носители заряда, движущиеся через p – n -переход, ускоряются настолько, что при соударении с атомами в зоне p – n -перехода ионизируют их [18]. В результате появляются пары электрон – дырка, которые в свою очередь ускоряются и могут вызвать ионизацию других атомов и т.д. Лавинный пробой возникает в высокоомных полупроводниках. Коэффициент ударной ионизации можно приближенно оценить по следующему эмпирическому выражению:

$$M \approx 1 / [1 - (U/U_\beta)^n], \quad (4.2)$$

где $n = 3$ для Si(p), Ge(n), $n = 5$ для Ge(p), Si(n);

$U_\beta = U_m \sqrt[n]{1 - \alpha}$ – характеристическое напряжение лавинного пробоя;

U_M – напряжение пробоя в схеме ОБ.

Включение лавинного транзистора по схеме ОЭ показано на рис. 4.5, а. Коллекторные характеристики в схеме ОЭ в области до пробоя имеют вид, показанный на рис. 4.5, б, где U_β – напряжение лавинного пробоя.

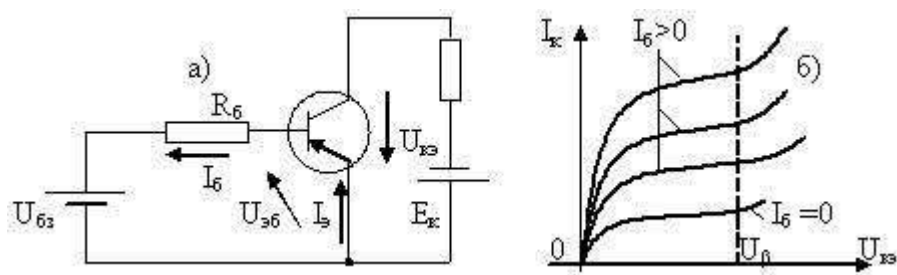


Рис. 4.5. Схема включения лавинного транзистора (а) и его коллекторные характеристики в предпробойной области (б)

Если обеспечить $I_\delta < 0$, то можно достичь такого положения, что при достижении U_β ток будет еще мал, однако вследствие ударной ионизации его значение будет определяться соотношением $I_\delta = -I_k = -M I_{ko}$. При дальнейшем увеличении $U_{кэ}$ увеличивается коэффициент M , $|U_{эб}|$ уменьшается ($U_{эб} = U_{бз} - M I_{ko} R_\delta$), а при $U_{эб} = 0$ переход открывается и $I_\delta \approx U_{бз} / R_\delta$. Если в обычном выражении тока коллектора транзистора $I_k = (\alpha I_\delta + I_{ko}) / (1 - \alpha)$ учесть коэффициент M , то получим:

$$I_k = M(\alpha I_\delta + I_{ko}) / (1 - M\alpha). \quad (4.3)$$

Это выражение по сути является ВАХ лавинного транзистора, если учесть, что $M = f(U)$. Коэффициент передачи тока α нелинейно зависит от значения тока эмиттера (рис. 4.6).

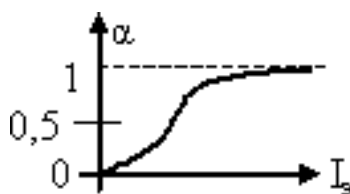


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента α от тока эмиттера $\alpha = f(I_\delta)$

В лавинном транзисторе можно создать режимы, не достижимые для обычных транзисторов. В частности, можно получить выходные характеристики с участком отрицательного дифференциального сопротивления, что даёт возможность строить на лавинных транзисто-

рах управляемые импульсные устройства. Вид выходных характеристик показан на рис. 4.7.

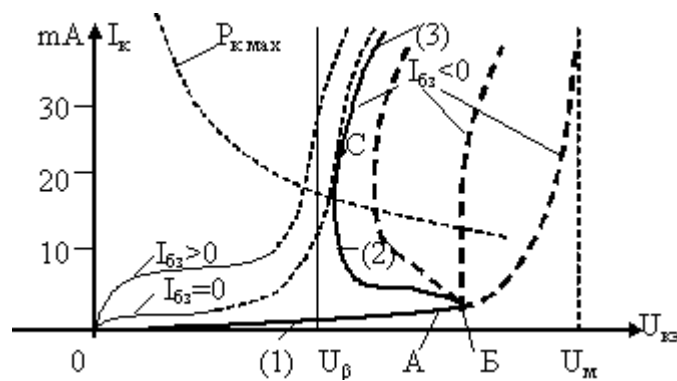


Рис. 4.7. Семейство ВАХ лавинного транзистора

На рис. 4.7 помимо выходных характеристик проведены дополнительные линии, ограничивающие область допустимых значений параметров транзистора: U_m – предельное значение напряжения $U_{КЭ}$; $P_{K \max}$ – максимальная допустимая мощность рассеяния коллектора. ВАХ, имеющая явно выраженный участок с отрицательным сопротивлением, содержит три участка: (1)-0AB, (2)-BC, (3)-C3 (рис. 4.7), что даёт возможность выполнить анализ работы транзистора для каждого из участков отдельно.

На начальном участке (1) эмиттерный переход заперт и следовательно $\alpha \approx 0$, $U_{КЭ}$ растет при слабом увеличении тока I_K . В точке А отпирается эмиттерный переход, $I_K = U_{\bar{\delta}} / R_{\bar{\delta}} > I_{KO} / \alpha$. Увеличение тока I_K обеспечивается (сопровождается) теперь увеличением $\alpha \cdot I_{\bar{\delta}}$ согласно выражению (4.3). Дифференциальное сопротивление перехода уменьшается, а в критической точке Б оно обращается в нуль и далее становится отрицательным. На участке (2) связь напряжения и тока можно выразить соотношением:

$$U_m \sqrt[n]{1 - (\alpha I_{\bar{\delta}} + I_{KO}) / I_K}, \quad (4.4)$$

где $I_{\bar{\delta}} = I_K + I_{\bar{\delta}3}$ при $I_{\bar{\delta}3} < 0$, $\alpha = f(I_{\bar{\delta}})$.

На участке (2) увеличение I_K сопровождается снижением $U_{КЭ}$. В этом можно убедиться, если взять $dU_{КЭ} / dI_K$. На участке BC сопротивление перехода эмиттер-коллектор транзистора имеет отрицательное значение (увеличение тока сопровождается уменьшением напряжения). В точке С сопротивление вновь обращается в нуль и затем

принимает положительное значение (участок 3). Изменяя величину тока базы $I_{бз}$ можем получить семейство характеристик, при этом точка Б смещается незначительно, а точка С может смещаться от U_{β} до U_m . Специфика лавинного транзистора состоит в том, что он может длительно работать в рассматриваемых режимах, причем ВАХ с отрицательным участком получается при сравнительно большом коллекторном напряжении $U_{кэ} \approx (20 - 30) \text{ В}$.

Лавинные транзисторы используются в формирователях мощных импульсов тока (до десятков А) с очень малым временем нарастания (коротких импульсов с частотой до 100 мГц) и в усилителях электрических колебаний дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн [25].

4.4. Динисторы и тиристоры

Динисторы и тиристоры – это полупроводниковые приборы, имеющие четырёхслойную структуру, состоящую из чередующихся областей p и n -полупроводника. Динистор имеет два вывода и три p – n -перехода.

Структура динистора представлена на рис. 4.8:

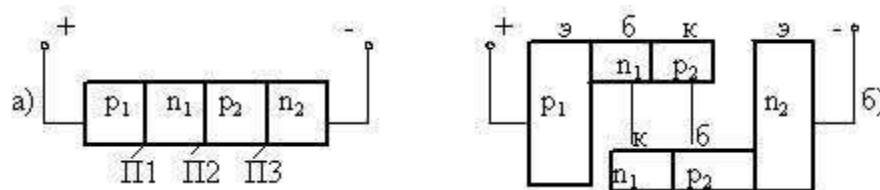


Рис. 4.8. Структура динистора (а) и её двухтранзисторное представление (б)

Если приложить к динистору внешнее напряжение («+» к области p_1 , а «-» к области n_2), то переходы Π_1 , Π_3 окажутся смещенными в прямом направлении, а переход Π_2 – в обратном. Переход Π_2 называют коллекторным. Следовательно, всё внешнее напряжение

будет приложено к коллекторному переходу, но ток в цепи не течет. Представленная выше двухтранзисторная структура динистора (рис. 4.8, б) позволяет создать схему его транзисторного аналога (рис. 4.9, а).

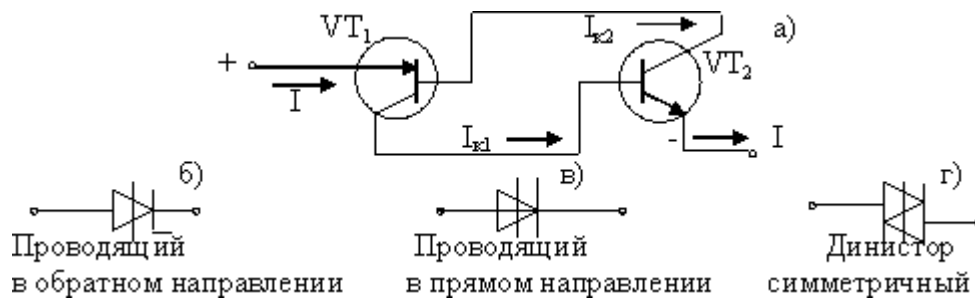


Рис. 4.9. Схема транзисторного аналога (а) и условные графические обозначения динисторов (б), (в), (г)

Транзисторный аналог динистора позволяет выяснить соотношения для токов. На схеме рис. 4.9, а видно, что $I = I_{\kappa 1} = I_{\kappa 2} = I_{\kappa 1} + I_{\kappa 2}$, с другой стороны $I = \alpha_1 I_{\kappa 1} + \alpha_2 I_{\kappa 2} + I_0 = I_0 / (1 - \alpha_1 - \alpha_2)$, где I_0 – обратный ток коллекторного перехода; α_1, α_2 – коэффициенты передачи тока от перехода Π_1 к Π_2 и от Π_2 к Π_3 .

Пока коллекторный переход смещён в обратном направлении, практически все приложенное напряжение падает на нем. Поэтому при больших напряжениях следует учитывать ударную ионизацию в этом переходе. Если для упрощения принять один и тот же коэффициент лавинного умножения M для обратного тока и коэффициентов передачи, то выражение для тока I примет следующий вид:

$$I = \frac{M I_0}{1 - M(\alpha_1 + \alpha_2)} . \quad (4.5)$$

Это похоже на выражение (4.3) для тока лавинного транзистора. ВАХ динистора имеет S-образный вид (рис. 4.10). Переключение происходит при $M(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$, когда сопротивление структуры становится малым (дифференциальное сопротивление стремится к нулю).

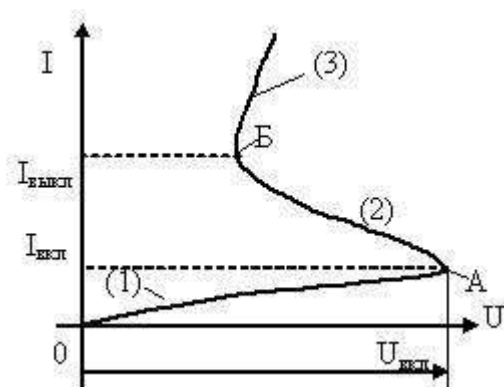


Рис. 4.10. Статическая ВАХ динистора

Принцип действия динистора можно пояснить следующим образом.

Так как переходы Π_1 и Π_3 смещены в прямом направлении, из них в области баз (n_1 и p_2) инжектируются носители заряда: дырки — из области p_1 , электроны — из области n_2 . Эти носители диффундируют в базах к коллекторному переходу и его полем перебрасываются через p – n -переход. (В обратных направлениях движутся и дырки и электроны, образуя ток I_0) При малых значениях приложенного напряжения все оно практически падает на коллекторном переходе Π_2 , к переходам Π_1 и Π_3 приложены малые значения падения напряжения, инжекция носителей невелика. Ток мал и равен обратному току перехода Π_2 и вначале меняется незначительно. С дальнейшим возрастанием напряжения, по мере увеличения ширины перехода Π_2 , все больше проявляется ударная ионизация. Когда достигается значение напряжения лавинного пробоя, развивается лавинный процесс. Ток через переход Π_2 увеличивается, но его сопротивление уменьшается значительно сильнее, и падение напряжения на нем тоже уменьшается. Это, в свою очередь, приводит к повышению напряжений, приложенных в прямом направлении к переходам Π_1 и Π_3 , и увеличению инжекции через них, что вызывает дальнейший рост коллекторного тока. Сопротивление перехода Π_2 становится малым, в цепи потечёт ток, величина которого будет ограничиваться только внешним сопротивлением (происходит переключение динистора из непроводящего состояния в проводящее). На ВАХ этому процессу соответствует участок АБ с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Переключение происходит практически мгновенно, поэтому участок АБ — это участок неустойчивой работы прибора. Ток в цепи динистора изменяется от значения $I_{вкл}$ до значения $I_{выкл}$ (рис. 4.10). После пе-

реключения ВАХ аналогична ветви характеристики диода, смещенного в прямом направлении.

Если от одной из баз динисторной структуры сделать отвод (управляющий электрод), то получим управляемый прибор, называемый *тиристором* (тринистором).

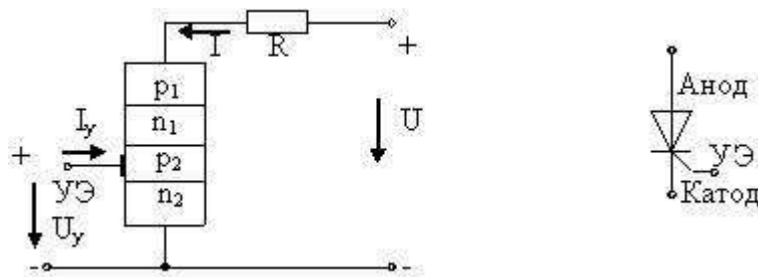


Рис. 4.11. Структурная схема и УГО тиристора с управлением по катоду

Если на переход $p_2 - n_2$ (рис. 4.11) подать внешнее смещение (напряжение U_y), то в цепи управления потечёт ток управления I_y , ток через переход $p_2 - n_2$ увеличивается, вызывая снижение потенциального барьера коллекторного перехода $n_1 - p_2$. Лавинный пробой перехода $n_1 - p_2$ произойдёт при меньшем значении внутреннего напряжения, приложенного к этому переходу. В главной цепи тиристора под действием внешнего (анодного) напряжения потечёт ток I , величина которого будет определяться сопротивлением резистора R . С некоторыми допущениями ток в главной цепи можно определить по соотношению:

$$I = M (I_0 + \alpha_2 I_y) / [1 - M(\alpha_1 + \alpha_2)], \quad (4.6)$$

где $\alpha_2 I_y$ – добавка тока управления.

Увеличение тока через переход $p_2 - n_2$ увеличивает вероятность возникновения лавинного процесса. Поэтому, изменяя ток, можно менять напряжение, при котором происходит переключение тиристора, и тем самым управлять моментом его включения. Принцип действия тиристора хорошо иллюстрируется семейством его ВАХ, построенных при разных значениях тока управления (рис. 4.12). ВАХ, соответствующая значению $I_y = 0$, является по сути ВАХ динистора и определяет предельное значение напряжения между анодом и катодом, которое может без пробоя выдержать тиристор. При отсутствии или недостаточной величине сопротивления резистора R (рис. 4.11) в случае достижения внешним напряжением предельного значения тиристор будет повреждён чрезмерно большим током.

Для рассмотрения работы тиристора в электрической цепи, содержащей источник питания с напряжением U и нагрузочный резистор R , совместим семейство ВАХ тиристора и резистора (рис. 4.12).

Линию нагрузки проводим по точкам U_1 / R , U_1 . Исходная рабочая (характеристическая, изображающая) точка «а» находится на пересечении линии нагрузки с ВАХ тиристора при $I_y = 0$.

Для включения тиристора в его цепь управления подаётся ток управления $I_{y1} > 0$. Исходная рабочая точка «а» переместится в положение (a_1), которому соответствует ВАХ при токе управления I_{y1} и напряжении переключения U_n .

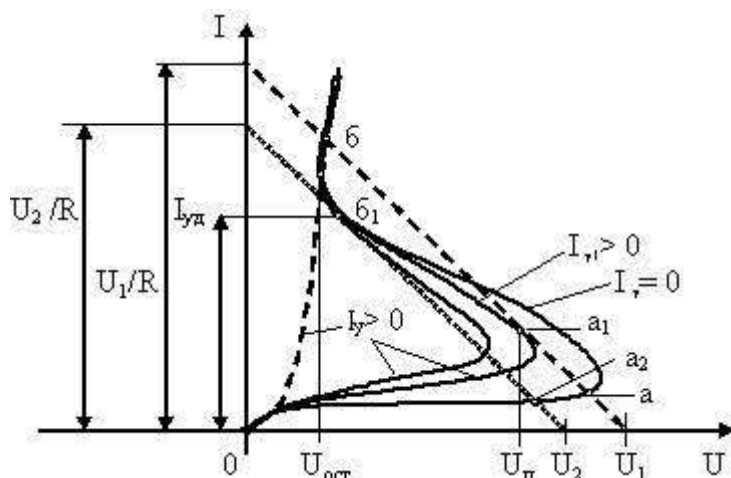


Рис. 4.12. Семейство ВАХ тиристора и резистора при изменении тока управления

Тиристор открывается, что соответствует переходу изображающей точки из положения (a_1) в положение ($б$). Напряжение на тиристоре становится малым и равным $U_{ост}$, а максимальное значение тока I ограничено сопротивлением резистора R . Чтобы выключить тиристор, нужно либо уменьшить ток в его главной цепи до значения тока удержания ($I < I_{yд}$) путем понижения напряжения U до U_2 после отключения цепи управления, либо создания в цепи УЭ управляющего тока противоположной полярности. Этот процесс на рис. 4.12 характеризует линия нагрузки, проведённая параллельно первой через точку $I_{yд}$, и отсекающая от оси токов участок U_2 / R . При этом рабочая точка из положения ($б_1$) перейдет в положение (a_2), а при восстановлении напряжения — в положение (a).

В настоящее время тиристоры используются преимущественно

в силовой электронике, как мощные управляемые коммутаторы сило-

вых электрических цепей. Применяются тиристоры не только с односторонней проводимостью с управлением по катоду либо по аноду, но и симметричные (симисторы), проводящие ток в обоих направлениях [13]. УГО некоторых видов тиристоров показаны на рис. 4.13.

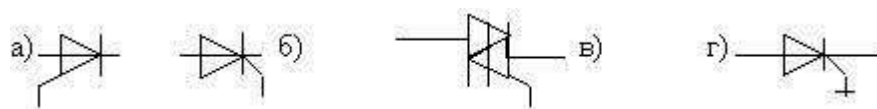


Рис. 4.13. Условные графические изображения тиристоров: управляемый (а), по катоду (б), симметричный (в), запираемый (г) по аноду

К основным параметрам тиристора относятся допустимые значения токов и напряжений, скорости их изменения, время включения – выключения.

5. КОМПОНЕНТЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Оптоэлектроника – раздел электроники, изучающий использование эффекта взаимодействия электромагнитных волн оптического диапазона ($3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{17}$ Гц, $1 \text{ мм} - 1 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}$) с электронами в веществах и методы создания оптоэлектронных приборов (ОЭП) и устройств, использующих это взаимодействие для генерации, передачи, хранения, обработки и отображения информации [9]. Длина волны излучения определяется соотношением:

$$\lambda[\text{м}] = \frac{C}{f} = \frac{300 \cdot 10^6[\text{м/с}]}{f[1/\text{с}]} \quad (5.1)$$

Время возникновения идей оптоэлектроники (ОЭЛ) – 50-е годы XX века. Как самостоятельный раздел науки и техники ОЭЛ начала

формироваться в 60-е годы (появление лазеров и излучающих диодов). С 1970-х годов возникла интегральная оптика.

Большинство современных ОЭП и устройств работает в диапазоне волн $(0,5 - 1,5)$ мкм, $(6 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{14})$ Гц. Работа этих устройств основана на использовании различных видов люминесценции (холодное свечение, продолжающееся после исчезновения облучения), электро-магнито-акусто-оптических эффектов, фотоэлектрических явлений.

Достоинства и преимущества ОЭЛ по сравнению с традиционной полупроводниковой электроникой обусловлены:

- электрической нейтральностью квантов оптического излучения
- фотонов;
- высокой частотой световых колебаний;
- малой расходимостью светового луча (до $1''$) и возможностью его фокусировки [9].

Электрическая нейтральность фотонов обеспечивает невосприимчивость оптических каналов связи к воздействиям электромагнитных полей, т.е. обеспечивает высокую помехозащищенность; полную гальваническую развязку входных и выходных цепей; двойную (пространственную и временную) модуляцию потока оптического излучения.

Высокая частота световых колебаний обеспечивает высокую информационную емкость оптических каналов связи.

Малая расходимость светового луча позволяет передать энергию оптического излучения с минимальными потерями.

Основными оптоэлектронными элементами являются:

- а) источники когерентного (связанного, при сложении усиливающегося) излучения (полупроводниковые лазеры) и некогерентного излучения [излучающие диоды (ИК, УФ, светодиоды)];
- б) оптические среды (активные, пассивные);
- в) приемники оптического излучения (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры);
- г) оптические элементы (линзы, призмы, зеркала, поляризаторы):

- волоконно-оптические элементы [жгуты, фоконы (фокус, конус)],
- селфоки (self focusing);
- интегрально-оптические элементы (оптические зеркала, фильтры).

Широкое применение находят в электронно-вычислительных средствах излучающие диоды, оптоэлектронные пары, оптоэлектронные переключатели, оптроны, различные классы индикаторов.

5.1. Излучающие диоды

Излучающий диод – это диод, содержащий полупроводниковый p – n -переход, в котором при прохождении электрического тока генерируется оптическое излучение в инфракрасной (ИК), видимой или ультрафиолетовой (УФ) области спектра. Распространены инфракрасные и излучающие в видимой части спектра диоды (светодиоды). Прохождение тока через p – n -переход в прямом направлении в светодиодах сопровождается рекомбинацией инжектированных носителей заряда. В определенных материалах (GaAs, GaSb, InAs, InSb и т.д.) процесс рекомбинации сопровождается выделением кванта света – фотона, при этом возникает некогерентное свечение люминисценции. Цвет свечения зависит от материала примеси полупроводника: примесь ZnO – красный цвет, азот N – зеленый, (ZnO + N) – желтый, оранжевый. Основные характеристики светодиода (ВАХ и характеристика яркости) показаны на рис. 5.1.

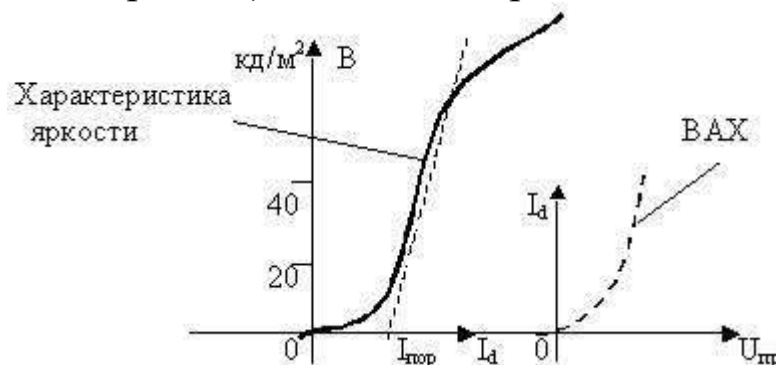


Рис. 5.1. ВАХ и характеристика яркости светодиода

Характеристика яркости имеет нелинейный начальный участок, на котором яркость мала, и линейный участок, в пределах которого яркость изменяется в десятки раз (рис. 5.1). Именно этот участок чаще всего используется. На этом участке яркость свечения:

$$B = B_0 (I_d - I_{нор}), \quad (5.2)$$

где B_0 – чувствительность по яркости;

I_d – ток светодиода;

$I_{пор}$ – пороговый ток – ток, при котором возможна линеаризация характеристики, $I_{пор} \approx (0,1 - 2,5)$ мА.

Аналитическое выражение ВАХ:

$$I_d = I_m [(\exp(U/M\phi_m) - 1)], \quad (5.3)$$

где I_m – тепловой ток;

ϕ_m – тепловой потенциал, $M=(0,5 - 2)$.

В эквивалентной схеме (рис. 5.2, в) обозначено: R – омическое сопротивление кристалла полупроводника и контактов; R_d – сопротивление p – n –перехода, зависящее от тока; C_d – емкость p – n –перехода, зависящая от тока.

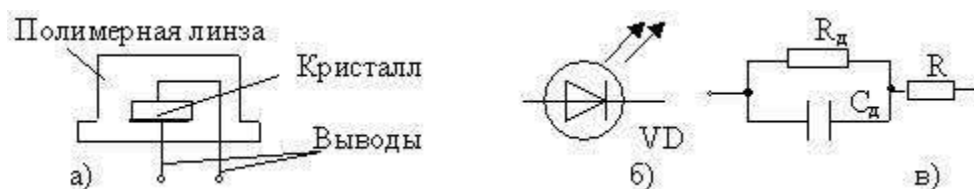


Рис. 5.2. Конструкция (а), УГО (б) и эквивалентная схема (в) светодиода

Материалы для светодиодов – арсенид галлия GaAs, фосфид галлия GaP и другие.

Основные параметры светодиодов:

1. Сила света – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении. Единица измерения – Вт/ср (ватт/стерадиан) или мКд (миликанделла), яркость измеряется в Кд/м². Для светодиодов сила света составляет (0,1 – 10) мКд.

2. Цвет свечения (длина волны излучения).

3. Постоянное прямое напряжение – падение напряжения при заданном токе, равное (2 – 4) В.

4. Угол излучения – плоский угол, в пределах которого сила света составляет не менее половины ее максимального значения.

5. Характеристики яркости, ВАХ, КПД преобразования.

5.2. Фоторезисторы

В фоторезисторах используется явление изменения сопротивления вещества под действием излучения. Под действием света в фоторезисторе возрастает концентрация подвижных носителей заряда за счет того, что кванты электромагнитного излучения возбуждают

электроны и переводят их из валентной зоны в зону проводимости. Фотопроводимость ζ_ϕ характеризуется изменением электропроводности кристалла по сравнению с его затемненным состоянием:

$$\zeta_\phi = q(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p), \quad (5.4)$$

где Δn , Δp – приращения концентраций зарядов в результате облучения;

μ_n , μ_p – подвижности отрицательных и положительных зарядов.

Конструктивно фоторезистор (ФР) представляет собой пленку полупроводника, сформированную на основании и имеющую отводы, укрепленные в корпусе (рис. 5.3).



Рис. 5.3. Конструктивное представление и УГО фоторезистора

Свет может облучать поверхность либо параллельно, либо перпендикулярно токоотводящим поверхностям. Основные характеристики фоторезисторов показаны на рис. 5.4.

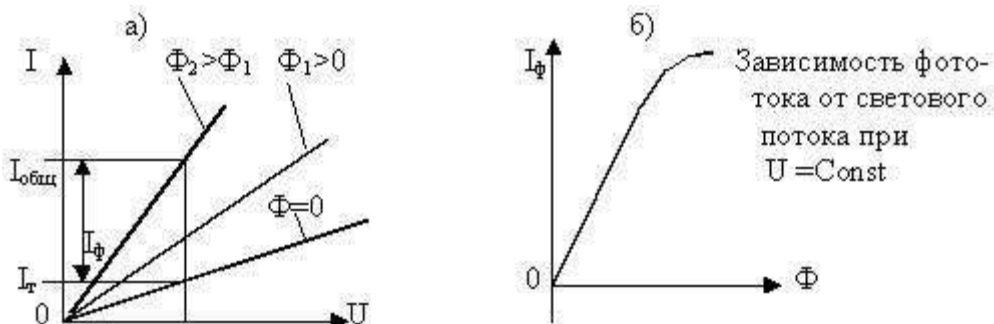


Рис. 5.4. ВАХ (а) и энергетическая характеристика (б) фоторезистора

Фоторезистор – пассивный элемент, ток в нём возникает только при подаче на него напряжения питания U , но величина тока зависит и от величины светового потока Φ , падающего на его поверхность. Ток фоторезистора $I_{общ}$ имеет две составляющих: I_ϕ – фототок, обусловленный наличием светового потока; I_m – темновой ток (при $\Phi = 0$), $I_{общ.} = I_m + I_\phi$.

Энергетическая характеристика в области малых потоков линейна, затем рост тока замедляется из-за увеличения рекомбинаций носителей заряда.

Основные параметры фоторезистора:

1. Чувствительность – это отношение выходной величины к входной. Обычно используют для ФР токовую чувствительность – отношение приращения фототока к вызвавшему его приращению величины, характеризующей излучение:

а) токовая чувствительность к световому потоку:

$$S_{\Phi \text{ диф}} = \Delta I_{\Phi} / \Delta \Phi;$$

б) токовая чувствительность к освещенности E :

$$S_{E \text{ диф}} = \Delta I_{\Phi} / \Delta E.$$

Освещенность E измеряется в Люксах ($\text{Кд} \cdot \text{ср} / \text{м}^2$). Чаще всего используют величину удельной интегральной чувствительности, которая характеризует интегральную чувствительность, когда к фоторезистору приложено напряжение 1 В.

$$S_{\text{инт.}} = I_{\Phi} / \Phi. \quad (5.5)$$

Чувствительность ФР зависит от материала, из которого они изготовлены, что отражают спектральные характеристики [абсолютная (АСХ) и относительная (ОСХ)]. АСХ – это зависимость чувствительности от частоты (длины волны) падающего излучения. ОСХ – это зависимость относительной чувствительности от частоты (длины волны):

$$S(\lambda) = S_{\text{абс}}(\lambda) / S_{\text{абс.мах}}(\lambda),$$

где $S(\lambda)$, $S_{\text{абс}}(\lambda)$, $S_{\text{абс.мах}}(\lambda)$ – соответственно относительная, абсолютная, максимальная абсолютная чувствительности.

Характеристики $S(\lambda)$ имеют чётко выраженный максимум, соответствующий определённой длине волны облучения для каждого материала (рис. 5.5).

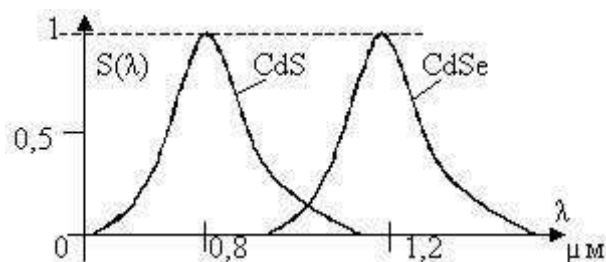


Рис. 5.5. Вид спектральных характеристик фоторезистора

2. Граничная частота $f_{гр}$ – это частота синусоидального сигнала, модулирующего световой поток, при котором чувствительность фоторезистора уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с чувствительностью немодулированного потока: $f_{гр} = (10^3 - 10^5)$ Гц.

3. Температурный коэффициент фототока:

$$\alpha_m = \partial I_\phi / \partial T \cdot 1 / I_\phi, \text{ при } \Phi = \text{Const}, \quad \alpha_m = (-10^{-3} - 10^{-4}) \text{ 1/град.}$$

4. Рабочее напряжение (5 – 100) В.

5. Допустимая мощность рассеяния (0,01 – 0,1) Вт.

5.3. Фотодиоды

Фотодиод (ФД) – полупроводниковый диод, обладающий свойством односторонней проводимости, возникающей при воздействии на него оптического излучения. ФД используется для преобразования оптического сигнала в электрический. Наиболее распространены $p-i-n$ -диоды, в которых толщина высокоомной i -области выбирается так, чтобы обеспечить наилучшие свойства (чувствительность и быстродействие) прибора. $p-i-n$ -структура образуется, если области p и n разделены высокоомным слоем (рис. 5.6) с собственной (i) проводимостью для снижения напряженности поля в переходе.

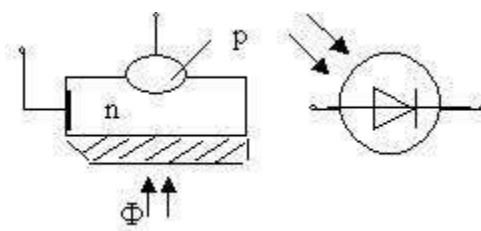


Рис. 5.6. Структура и УГО фотодиода

Действие фотодиода основано на поглощении света вблизи области p – n -перехода, в результате чего генерируются новые носители заряда (электронно-дырочные пары).

Различают два режима работы ФД:

а) фотодиодный, когда имеется источник питания, создающий обратное смещение;

б) вентильный (фотогенераторный), когда такой источник отсутствует.

В фотодиодном режиме возникающие в результате фотогенерации носители зарядов приводят к возрастанию обратного тока, который зависит от интенсивности падающего излучения и практически не зависит от величины обратного напряжения (рис. 5.7).

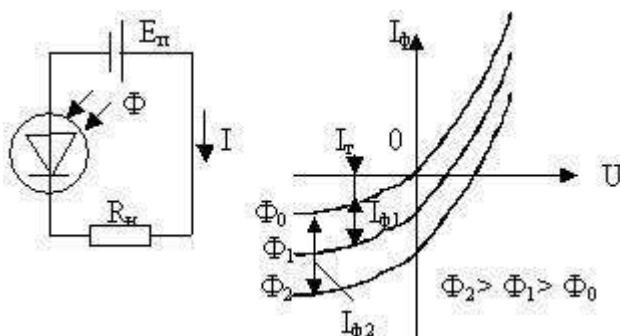


Рис. 5.7. Схема включения и ВАХ ФД в фотодиодном режиме

В вентильном (фотогенераторном) режиме ФД используется как фотогенератор (источник фотоэдс, фотоэлемент).

Фотоэдс E_ϕ зависит от светового потока и свойств полупроводника:

$$E_\phi \approx \varphi_T \ln (I_\phi / I_0) = \varphi_T \ln (S_{инт} \Phi / I_0), \quad (5.6)$$

где φ_T — тепловой потенциал;

I_ϕ — фототок:

$$I_\phi = S_{инт} \Phi;$$

$S_{инт}$ — интегральная токовая чувствительность;

I_0 — тепловой ток p – n -перехода.

Основные характеристики и параметры фотодиода:

1. Энергетические характеристики $I_\phi = f(\Phi)$ – зависимости фототока от светового потока (рис. 5.8, а). При работе в генераторном режиме $I_\phi = f(\Phi)$ линейна, если $R_n = 0$ (коротко замкнутый ФД) (рис. 5.8, б). С ростом R_n характеристики искривляются.

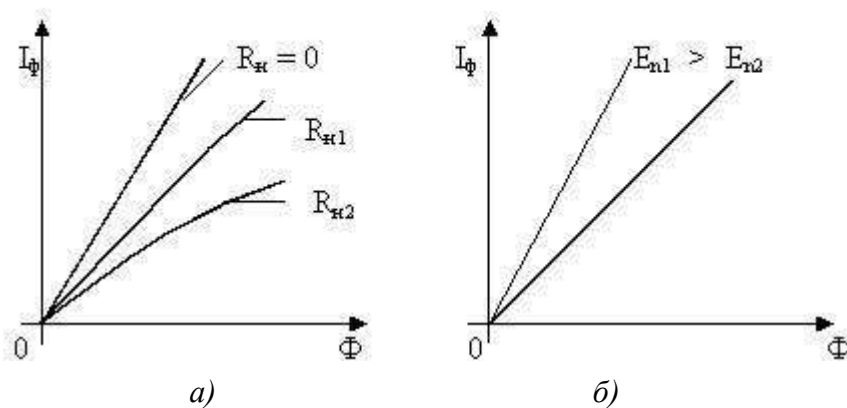


Рис. 5.8. Энергетические характеристики фотодиода:

а – фотогенераторный режим, б – фотодиодный режим

2. Спектральные характеристики фотодиода аналогичны характеристикам фоторезистора.

3. Граничная частота – частота, при которой интегральная чувствительность уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со статическим значением $f_{gr} \approx 10^7$ Гц = 10 МГц. У фоторезисторов $f_{gr} \approx (1 - 100)$ кГц.

Сейчас разработаны ФД на основе $p-i-n$ -структур, барьеров Шоттки, лавинные ФД, предназначенные в основном для повышения быстродействия и увеличения чувствительности.

5.4. Фототранзисторы

Фототранзистор (ФТ) – транзистор (обычно биполярный), в котором управление коллекторным током осуществляется на основе внутреннего фотоэффекта. ФТ служит для преобразования световых сигналов в электрические с одновременным усилением последних. Включение ФТ во внешнюю электрическую цепь подобно включению транзистора по схеме с общим эмиттером, обычно с нулевым током базы (вывод базы отключен от внешней цепи). Такой режим

характерен только для ФТ и носит название «режим с плавающей базой».

Фототранзистор сделан так, что излучение попадает на область базы. В результате поглощения энергии в базе генерируются электронно-дырочные пары, участвующие в создании фототока. При отсутствии облучения ($\Phi = 0$) между коллектором и эмиттером течет темновой ток, т.е. обратный ток p – n -перехода. Схемы включения ФТ показаны на рис. 5.9.

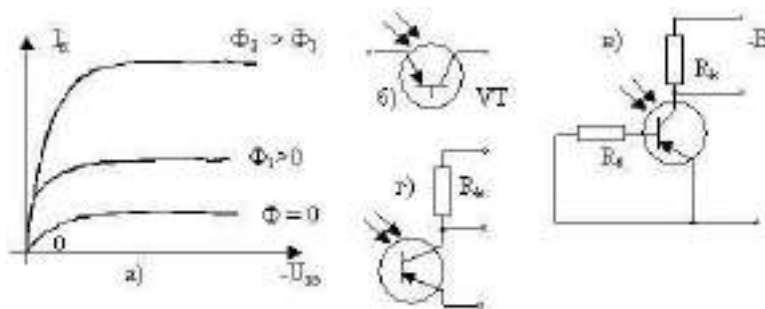


Рис. 5.9. Выходные характеристики (а), УГО (б) и схемы включения фототранзистора при наличии (в) и отсутствии (з) базового вывода

Основные характеристики и параметры фототранзистора:

1. ВАХ фототранзистора подобны ВАХ транзистора в схеме с ОЭ, но параметром служит не ток базы, а поток Φ (рис. 5.9, а).

2. Энергетические $I_\phi = f(\Phi)$ и спектральные $S(\lambda)$ характеристики подобны характеристикам ФД.

3. Коэффициент усиления по фототоку:

$$K_{y\phi} = (1 + h_{21\phi}).$$

4. Ширина полосы пропускания – $(10^4 - 10^5)$ Гц.

5. Значение темнового тока (при $\Phi = 0$).

6. Токовая чувствительность $S_{инт} = I_\phi / \Phi$.

В качестве высокочувствительных фотоприемников используются также полевые фототранзисторы, имеющие более широкую полосу пропускания $(10^6 - 10^8)$ Гц. Используются также фототиристоры.

5.5. Оптроны

Оптроны – это полупроводниковые приборы, состоящие из излучателя света и фотоприемника, взаимодействующих друг с другом и помещенных в общем корпусе. Оптроны используют для оптиче-

ской связи отдельных частей радиоэлектронных устройств. С помощью оптронов обеспечивается электрическая развязка между частями устройства (гальваническое разделение цепей).

В оптронах между источником излучения и фотоприемником имеется среда, выполняющая функции световода. Эта среда должна иметь большой коэффициент преломления для согласования с большим коэффициентом преломления материалов, служащих источниками света. Среда с большим коэффициентом преломления называется иммерсионными: это свинцовые и селеновые стёкла с коэффициентами преломления соответственно (1,7–1,9) и (2,4–2,6).

Оптроны широко применяются в самых различных устройствах автоматики и электронной техники. Конструкции и параметры оптронов постоянно совершенствуются с целью уменьшения потребления энергии источниками излучения и расширения функциональных возможностей фотоприёмной части.

Структуры диодных оптронов с разными световодами приведены на рис. 5.10. Примеры обозначений оптронов показаны на рис. 5.11.

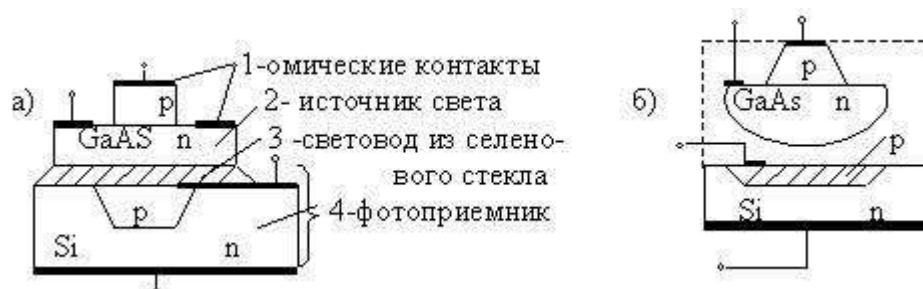


Рис. 5.10. Структура диодных оптронов со световодом из стекла (а) и вакуумным (воздушным) световодом (б):

1 – омические контакты; 2 – источник света;
3 – световод из селенового стекла; 4 – фотоприемник

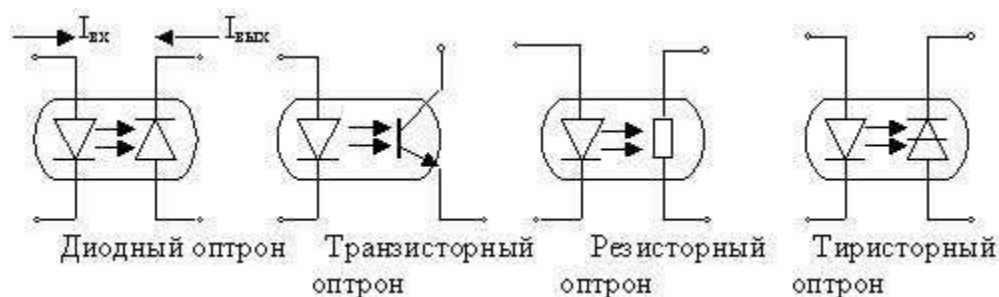


Рис. 5.11. Условные изображения оптронов разных типов

Сопротивление между входной и выходной цепями оптронов составляет ($10^{13} - 10^{15}$) Ом. Диодные, транзисторные и тиристорные оптроны используют в основном в ключевых режимах. Резисторный оптрон чаще всего применяют в усилительных устройствах. Сейчас разработаны оптроны, в которых совмещаются функции простейших оптронов и электронных преобразователей (усилителей), выполняемых на одной подложке [13]. Условное графическое изображение такого оптрона показано на рис. 5.12.

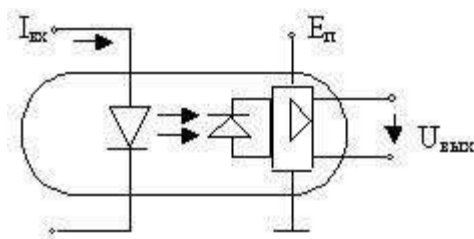


Рис. 5.12. Пример УГО оптрона с усилительным элементом на выходе

Промышленностью серийно выпускаются оптоэлектронные коммутаторы сигналов, состоящие из арсенид-галлиевого излучателя, кремниевого фотодиода и интегрального усилителя, обеспечивающего выходные уровни напряжения, достаточные для управления логическими элементами ТТЛ-серий (серии К249ЛП1, К262КП1 и др.). Входной ток оптоэлектронных коммутаторов не превышает 20 мА, ёмкость между входом и выходом – не более 5 пФ [13].

6. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНДИКАТОРОВ И ЛАЗЕРОВ

Там, где информацию требуется представить в форме, удобной для визуального восприятия часто применяются устройства, называемые *индикаторами*. Основные компоненты этих устройств – это приборы, обеспечивающие преобразование электрических сигналов в пространственное распределение яркости излучения или в распределение степени пропускания или поглощения светового излучения [4]. Из электрических сигналов в этих приборах получают ви-

димое изображение букв, цифр, геометрических фигур, знаков, полос, мнемосхем и пр.

Устройства отображения информации создаются на основе таких активных излучательных компонентов как:

- электронно-лучевые трубки;
- газонаполненные источники излучения;
- электролюминесцентные и накаливаемые приборы.

Широко распространены пассивные излучательные компоненты: жидкокристаллические, электрохромные, электрофоретические.

Цвет пассивных электрохромных компонентов зависит от интенсивности поля. В электрофоретических приборах под действием электрического поля перемещаются заряженные пигментные частицы.

Наиболее часто применяют знакосинтезирующие индикаторы (ЗСИ) и электронно-лучевые трубки (ЭЛТ), дисплей. Дисплей – это устройство отображения информации, обеспечивающее связь человека с машиной.

По виду отображаемой информации ЗСИ делятся на:

- единичные (точка, запятая, круг, квадрат);
- цифровые;
- буквенно-цифровые (и специальные математические символы);
- шкальные (информация в виде уровней или значений величин);
- мнемонические (для изображений фрагментов мнемосхем);
- графические (графики, символы, спецзнаки).

По виду элементов и способу формирования информационного поля:

- сегментные;
- матричные.

По виду питающего напряжения:

- постоянного тока;
- переменного тока;
- пульсирующего тока.

По значению питающего напряжения:

- низковольтные (менее 5 В);
- средневольтные (менее 30 В);
- высоковольтные (более 30 В).

6.1. Вакуумные люминесцентные индикаторы

Вакуумные люминесцентные индикаторы (ВЛИ) относятся к активным источникам излучения, преобразующим электрическую энергию в световую. Используются в микрокалькуляторах и ЭВМ, кассовых аппаратах, электронных часах и приборах. ВЛИ представляет собой электронную диодную или триодную систему, в которой под воздействием электронной бомбардировки высвечиваются покрытые низковольтным катодлюминофором сегменты – аноды (рис. 6.1).

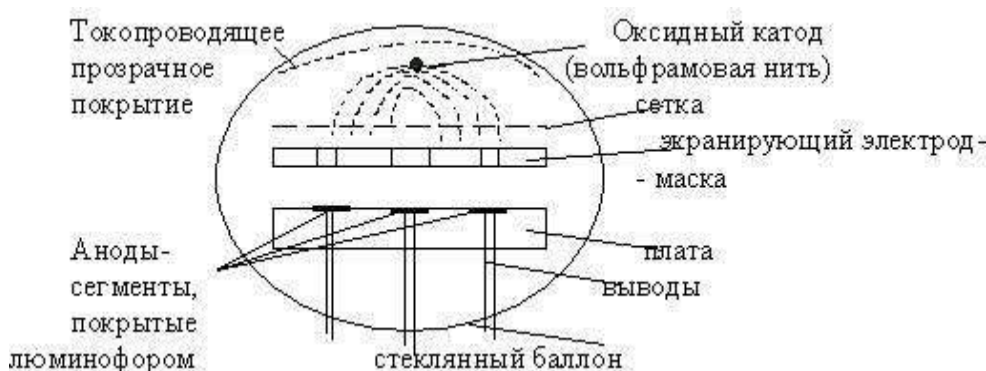


Рис. 6.1. Конструктивная схема электровакуумного люминесцентного накаливаемого индикатора (поперечный разрез)

Низковольтная вакуумная *катодная люминесценция* носит рекомбинационный характер: люминофор бомбардируется электронами, что приводит к нарушению его термодинамического равновесия. Появляются активные электроны и дырки, которые рекомбинируют между собой, излучая фотоны. Низковольтная катодлюминоесценция

возникает при небольших ускоряющих напряжениях, приложенных между анодом и катодом (единицы – десятки Вольт).

ВЛИ выпускаются одnorазрядные и многоразрядные, в цилиндрических и плоских баллонах, с различными размерами знаков разных типов:

– типа ИВ, ИВЛ (люминесцентные), например, ИВ27 имеет 24 вывода, яркость 500 кд/м^2 (для сравнения цветной кинескоп – 300 кд/м^2);

– шкальные – ИВЛШ;

– со встроенным управлением – ИВЛШУ;

– матричные – ИВЛМ;

– одноцветные и многоцветные индикаторы типа ИЛТ (бытовые).

Формирование изображения на информационном поле ВЛИ осуществляется статическим или мультиплексным (динамическим) способами. Статический способ – возбуждающие сигналы подаются на аноды – сегменты и изображение знака формируется одновременно. При динамическом способе возбуждающие сигналы подаются в определенной последовательности с заданной частотой, создавая эффект непрерывного свечения. Частота должна быть не ниже 50 Гц во избежание мелькания изображения.

6.2. Электролюминесцентные индикаторы

Электролюминесцентные индикаторы (ЭЛИ) предназначены для отображения различной информации в системах управления и контроля. В них также используется явление люминесценции, заключающееся в том, что некоторые вещества способны излучать свет под действием электрического поля. ЭЛИ в простейшем случае представляет собой плоский конденсатор с диэлектриком – слоем органической смолы с люминесцентным порошком на основе сульфида или селенида цинка (ZnS , ZnSe). Добавление активаторов обеспечивает цвет свечения: зеленый, голубой, желтый, красный, белый). Упрощенная структура ЭЛИ показана на рис. 6.2.



Рис. 6.2. Структура электролюминесцентного индикатора:

- 1 – стеклянная пластина; 2 – прозрачная токопроводящая пленка;
3 – слой люминофордиэлектрик; 4 – металлическая пленка

Принцип действия индикатора: переменное напряжение прикладывается к токопроводящим пластинам, под действием созданного электрического поля в слое люминофора возникает свечение. Электрод 4 (металлический) имеет форму букв или цифр, или сегментов для получения синтезируемых знаков или геометрических фигур. Электрод 2 (оксид олова) – сплошной и прозрачный. Наиболее распространены буквенно-цифровые сегментные индикаторы (для изображения цифр используются 7 – 9 сегментов, 19 сегментов используются для изображения любых букв русского и латинского алфавита).

ЭЛИ делают обычно с пластмассовым корпусом, питание осуществляется переменным напряжением частотой (400 – 1200) Гц. Линейные размеры могут быть от единиц до десятков миллиметров. Потребление – от долей мА до десятков мА. Срок службы – несколько тысяч часов. Яркость изображения – хорошая. Недостатком является сложная система управления.

6.3. Жидкокристаллические индикаторы

Жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ) – это пассивные приборы, в основу работы которых положено свойство некоторых веществ изменять свои оптические показатели (коэффициенты отражения, преломления, поглощения) под влиянием внешнего электрического поля. При этом вследствие модуляции падающего света изменяется цвет участков, к которым приложено электрическое поле, и на поверхности вещества появляется рисунок определенной конфигурации. Жидкокристаллическим (мезаморфным) называется термодина-

мически устойчивое состояние, при котором вещество сохраняет анизотропию (неодинаковость) физических свойств, присущую твердым кристаллам, и текучесть, характерную для жидкостей (производные бензола, стероидов и других соединений). Характерной особенностью жидких кристаллов (ЖК) является то, что молекулы имеют сравнительно большую длину и относительно малую ширину. ЖК-диэлектрики, имеющие удельное сопротивление $R_{уд.} = 10^6 - 10^{10}$ Ом·см. Плотность ЖК близка к плотности воды. Конструктивная схема элемента ЖКИ показана на рис. 6.3.

В ЖК используются три основных электрооптических эффекта:

- эффект, связанный с движением молекул вещества – динамическое рассеяние (ДР);
- эффект, связанный с поворотом молекул: твист – эффект (ТЭ);
- эффект «гость – хозяин» (Г – Х).

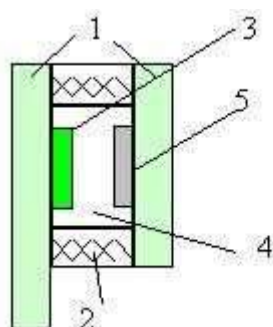


Рис. 6.3. Конструктивная схема элемента ЖКИ:

- 1 – стеклянные пластины; 2 – склеивающее соединение;
- 3 – передний прозрачный электрод (например, двуокись олова);
- 4 – ЖК; 5 – задний отражающий или прозрачный электрод

ЖКИ могут быть двух классов – работающие на просвет и работающие на отражение. Отражающие не требуют специальной подсветки. Работающие на просвет предполагают наличие дополнительного освещения.

В зависимости от вида используемого электрооптического эффекта технология изготовления ЖКИ различна. Например, в ЖКИ, работающих на эффекте ДР с отражением, на поверхности проводящих слоев наносится тонкое химически инертное прозрачное покрытие.

В ЖКИ, использующих отражение и твист-эффект (ТЭ), помимо стеклянных пластин имеются поляризаторы, внутренние поверхности пластин полируются.

В индикаторах Г – Х один слой (хозяин) взаимодействует с молекулами другого слоя (гостя). Слой ЖК-хозяина за счет поглощения световой энергии при отсутствии электрического поля приобретает окраску гостя, а под действием электрического поля – обесцвечивается. Эти цветовые различия хорошо воспринимаются в условиях высокой освещенности. ЖКИ, работающие в условиях низкой освещенности (менее 35 Кд/м²), работают с подсветкой. Для подсветки используют миниатюрные лампы накаливания.

Достоинством ЖКИ является малое потребление на:

- эффекте ДР – (5 – 10) мкВт/см²;
- эффекте ТЭ – не более 20 мкВт/см².

ЖКИ хорошо совместимы с КМОП микросхемами. Рабочие напряжения ЖКИ ДР не более 20 В, а на ТЭ – 5 В. Срок службы ЖКИ при эксплуатации достигает 40 тысяч часов (на переменном токе). Недостатком является низкое быстродействие (особенно при пониженных температурах) и зависимость параметров от температуры окружающей среды.

Управление ЖКИ обычно осуществляется сигналами переменного тока, так как долговечность ЖКИ, работающих на постоянном токе, оказывается на порядок ниже. Часто используют так называемый фазовый метод управления, при котором на общий электрод на задней поверхности и электроды на передней поверхности подаются прямоугольные импульсы, сдвинутые на 180⁰ при возбуждении, и без сдвига – при отсутствии возбуждения.

6.4. Полупроводниковые знакосинтезирующие индикаторы

Полупроводниковые знакосинтезирующие индикаторы (ППЗСИ) – это низковольтные приборы, основу которых составляет полупроводниковый диод, в *p–n*-переходе которого в результате рекомбинации электронов и дырок при их инжекции генерируется световое излучение. ППЗСИ удобно совмещаются с уровнями токов микро-

схем. Приборы имеют достаточно хороший уровень яркости, однако обладают относительно высокими уровнями рабочих токов.

Основные материалы для изготовления ППЗСИ – твердые растворы GaAs (арсенид галлия) и GaP (фосфид галлия). Примером единичных ППЗСИ являются светодиоды АЛ 102, АЛ 307, структуры которых показаны на рис. 6.4.



Рис. 6.4. Структурные схемы единичных ППЗСИ

Многоэлементные ППЗСИ. Выпускается несколько сотен типов ППЗСИ. Они различаются числом элементов, размерами, конфигурацией, цветом свечения, конструкцией. По числу элементов и их взаимному расположению в пределах поля одного разряда различают четыре типа знаковых индикаторов:

- 1) семисегментный – может быть цифровой, буквенно-цифровой;
- 2) девятисегментный – для изображения цифр и набора букв русского и латинского алфавита;
- 3) тридцати сегментный матричный – универсальный, позволяет изменять начертания отдельных символов;
- 4) пятисегментный – дополнение к девятисегментному, предназначен для изображения символов полярности и переполнения в цифровых устройствах. Пример цифрового индикатора, в котором каждый элемент – светодиод, показан на рис. 6.5.

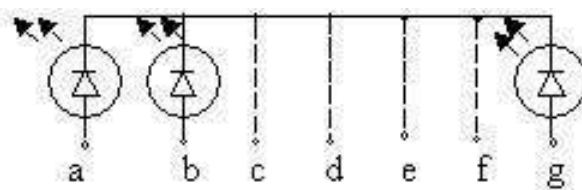
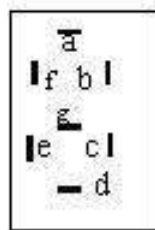


Рис. 6.5. Вид и схема одnorазрядного
семисегментного индикатора

6.5. Дисплей

Дисплей – это оконечное устройство информационных систем, служащее для визуального отображения информации и связи человека с вычислительным устройством (может быть в наручных часах, калькуляторах и т.п.).

Все дисплеи можно разделить на два класса: излучающие свет и модулирующие свет. Светоизлучающий дисплей должен давать свечение достаточной яркости, особенно, если используется при дневном освещении. Важен цвет свечения: человеческий глаз наиболее чувствителен к желтому и желто-зеленому цвету. Изображение должно быть контрастным. Контраст – это отношение максимальной яркости к минимальной. Учитывая, что человеческий глаз не различает изменения, происходящие быстрее, чем за 0,1 с, от дисплеев не требуется большое быстродействие. Разрешающая способность дисплея оценивается минимальным размером наблюдаемого элемента. Это может быть квадрат со стороной не менее 50 мкм. У многих дисплеев этот элемент больше и зависит от яркости и расстояния до наблюдателя.

Многие дисплеи обладают памятью, т.е. способностью сохранять изображение после снятия питания или с малым потреблением. Основные типы светоизлучающих дисплеев:

- а) электронно-лучевые устройства, (электронно-лучевые трубки);
- б) дисплеи на (СИД) светоизлучающих диодах – обычно имеют размер несколько сантиметров и низкое напряжение питания (5 В);
- в) дисплеи на газоразрядных элементах (плазменные), имеют две взаимно-перпендикулярные системы электродов в виде проводящих полос. Между электродами расположены ячейки с инертным газом (неон, ксенон или смесь). На этом принципе делаются газоразрядные индикаторные панели (ГИП), которые могут иметь, например, 512 горизонтальных и 512 вертикальных полос. Разрешающая способность (2 – 3) линии на 1 мм. Неон дает оранжевое свечение. Используя люминофор на электродах можно получить другой цвет. Питание ГИП возможно постоянным или переменным током;

г) электролюминесцентные дисплеи – составлены из ЭЛИ.

Основные типы светомодулирующих дисплеев:

- жидкокристаллический (ЖКД) имеет малую мощность, низкую стоимость. Может быть малого (в часах) и большого (в ноутбуках) размера;

- электрохромные (ЭХД) – основаны на использовании электрохромного эффекта, состоящего в том, что некоторые вещества под действием электрического поля или при прохождении тока меняют свой цвет. Таким веществом является, например, WO_3 – триоксид вольфрама. Его пленка под напряжением приобретает синий цвет. Требуемое напряжение (0,5 – 1,5) В. При перемене полярности напряжения пленка приобретает исходный цвет. Недостаток – невысокое быстродействие, небольшой срок службы;

- электрофорезные дисплеи (ЭФД) – используют явление электрофореза: под действием электрического поля в жидкости перемещаются взвешенные частицы (пигмент в окрашенной жидкости), притягиваются к электродам, образуя знаки, по цвету резко отличающиеся от цвета жидкости. Напряжение для ЭФД составляет десятки Вольт. Срок службы – десятки тысяч часов, быстродействие – низкое.

6.6. Лазеры

Принцип действия лазера основан на использовании синхронного и синфазного излучения атомов (когерентного излучения).

Идея лазера высказана советским учёным В.А. Фабрикантом в 1939 году. Идея состоит в следующем. Вещество содержит цепочки атомов, вытянутых в одну линию. Если эти атомы находятся в возбужденном состоянии, то внешний фотон, ударив в крайний атом, вызовет излучение нового фотона, который будет вызывать излучение следующего фотона и т.д. Световой поток увеличивается во много раз, теоретически до $\approx 10^{20}$ раз. Образуется огромное количество фотонов, имеющих одинаковую энергию и одинаковое направление движения, т.е. образуется *когерентное излучение*.

В реальности не все атомы могут быть возбуждены, поэтому могут поглощать энергию фотона и уменьшать излучение света.

Если число невозбужденных атомов равно числу возбужденных, никакого усиления излучения не будет. Чтобы произошло усиление когерентного излучения, необходимо в большинстве атомов «переселить» электроны на более высокие энергетические уровни (более удаленные от ядра орбиты) и сохранять это состояние достаточное время. С этой целью к данному веществу, называемому активной средой (рабочим веществом), нужно подводить каким-то образом энергию, вызывающую возбуждение атомов. Этот процесс называется накачкой. Работу лазера (оптического квантового генератора) можно пояснить следующим образом (рис. 6.6).



Рис. 6.6. Иллюстрация работы лазерного излучателя

В пространстве, заполненном активной средой, между двумя плоскими зеркалами (рис. 6.6), одно из которых 2 – полупрозрачное, движется поток излучаемых фотонов от зеркала 1 к зеркалу 2. Большая часть этого потока излучается через зеркало 2 во внешнюю среду в виде когерентного луча, а небольшая часть движется обратно, увеличиваясь по пути, затем отражается от зеркала 1, вновь движется к зеркалу 2, частично отражается и т.д.

Для поддержания атомов в возбужденном состоянии служит внешний источник энергии, осуществляющий накачку.

Основные свойства лазерного излучения:

1. Весьма малая расходимость луча (тысячные доли градуса), так как это поток параллельно летящих фотонов.

2. Лазерное излучение с помощью собирающих линз и зеркал можно сфокусировать в точку диаметром 0,5 мкм. (Если такой луч послать к Луне, то он осветит пятно диаметром 30 м.)

3. Высокая монохроматичность, т.е. практически излучение идет на одной единственной частоте. Полоса, которую занимает когерентное излучение лазера, составляет $\approx 10^{-3}$ Гц.

4. Можно в широких пределах управлять длительностью излучения (от длительных до сверхкоротких вспышек – 10^{-15} с). При этом мощность излучения оказывается очень большой, что приводит к тому, что вещества могут изменять свои свойства под действием лазерного излучения. Интенсивность такого излучения высока (при фокусировке – до 10^{20} Вт/см²), напряженность электрического поля в луче достигает 10^{11} В/см. Под действием такого поля многие вещества подвержены ионизации атомов и расщепляются на электроны и положительные ионы.

Типы лазеров [25]:

1) жидкостные лазеры, имеющие в качестве активной среды растворы органических красителей. Длина волны излучения $\lambda = (0,3 - 1,3)$ мкм (от ультрафиолетового до инфракрасного излучения);

2) газовые лазеры, в которых под действием накачки происходит диссоциация молекул газа и их возбуждение. Распространены СО₂-лазеры, которые могут иметь мощность до 10 кВт, $\lambda \approx 10$ мкм, $\eta \approx 40$ %. Имеется несколько разновидностей газовых лазеров:

а) фотодиссационные;

б) газоразрядные, имеющие в качестве активной среды разреженный газ, накачка в них осуществляется тлеющим разрядом (аргоновые, ионные лазеры);

в) лазеры на атомных переходах: $\lambda = (0,4 - 100)$ мкм. (Гелиево-неоновые лазеры, накачка осуществляется тлеющим разрядом переменным напряжением $U = 1000$ В);

г) молекулярные лазеры $\lambda = (0,2 - 50)$ мкм:

– разновидность – газодинамический СО₂-лазер, позволяет получить большую мощность (до 100 кВт);

– эксимерные лазеры – накачка быстрыми электронами, среда – инертный газ, $\lambda = 0,126$ мкм (наиболее короткая волна излучения);

3) химические лазеры – возбуждение за счет химических реакций;

4) полупроводниковые лазеры (твердотельные).

В твердотельных лазерах когерентное излучение получается при переходе электронов с нижнего уровня зоны проводимости на верхний уровень валентной зоны. Существует два типа таких лазеров.

Первый тип имеет пластину безпримесного полупроводника, в котором накачка производится пучком быстрых электронов с энергией (50 – 100) кЭВ, либо делается оптическая накачка. К таким полупроводникам относятся GaAs (арсенид галлия), CdS (сульфид кадмия), CdSe (селенид кадмия). Накачка электронным пучком вызывает сильный нагрев, поэтому требуется интенсивное охлаждение (до 80 °К). Накачка может быть поперечная либо продольная, последняя позволяет лучше обеспечить охлаждение кристалла полупроводника.

Второй тип – инжекционный лазер, представляющий собой кристалл с особым p – n -переходом (рис. 6.7).

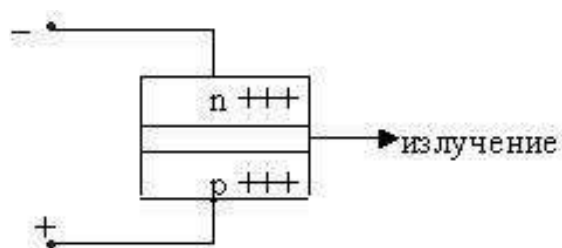


Рис. 6.7. Упрощенная структура
твердотельного инжекционного лазера

Полупроводник имеет высокую концентрацию примесей ($10^{18} \div 10^{19}$)/см³ (вырожденный полупроводник). Грани, перпендикулярные плоскости p – n -перехода отполированы и служат зеркалами оптического резонатора. На переход подается прямое смещение, происходит активная рекомбинация носителей (GaAs), генерируется излучение с длиной волны $\lambda = (0,8 - 0,9)$ мкм и коэффициентом полезного действия $\eta = (50 - 60) \%$. Такой лазер размером 1 мм дает мощность излучения до 10 мВт (в импульсе до 100 Вт).

Применение лазерного излучения. В настоящее время область применения лазерного излучения стремительно расширяется. Быстро развивается нелинейная оптика – область физики, изучающая взаимодействие лазерного излучения с различными веществами.

Лазерный луч может проникать через вещества, непрозрачные для обычного света. Изменение частоты (генерация гармоник) наблюдается при прохождении лазерного луча через некоторые вещества. При этом достигается КПД около 100 %. Лазерное излучение способно управлять движением атомов. Взаимодействие лазерного луча с атомами вещества вызывает появление в спектре этого вещества новых линий, по которым можно судить о новых свойствах этого вещества (нелинейная лазерная спектроскопия).

Важнейшая область применения – связь. Высокая направленность и огромный частотный диапазон позволяют разместить в узком диапазоне большое число передач. В космосе лазерный луч позволяет осуществить связь на огромные расстояния. На земле высококачественная связь лазерным лучом осуществляется по оптоволоконным линиям (световодам). В густом тумане лазерный луч позволяет использовать связь на расстоянии нескольких сотен метров.

Лазерное излучение используется в локаторах, в геодезических измерениях, при обработке твердых материалов, в качественных видео и звукозаписях, в медицине (лазерный скальпель), в биологии – для изучения процессов фотосинтеза и т.п. Лазеры, использующие излучение СВЧ-диапазона (сантиметровые и миллиметровые волны), называют мазерами [25].

МОДУЛЬ 2. ОСНОВЫ АНАЛОГОВОЙ СХЕМОТЕХНИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

7. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

7.1. Общие сведения об усилителях электрических сигналов

Усилителем называется устройство, способное путем затраты небольшого количества энергии управлять потоком гораздо большей энергии, получаемой от какого-либо источника [21]. Если управляющая и управляемая величины (энергия) являются электрическими, усилитель называют усилителем электрических сигналов.

Классификация усилительных устройств по двум основным признакам приведена на рис. 7.1.

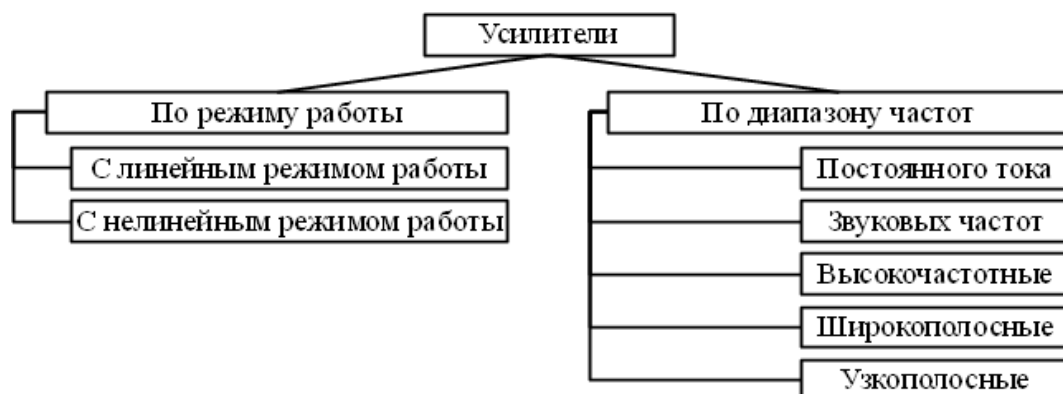


Рис. 7.1. Примерная классификация усилителей электрических сигналов

Классификация чаще всего делается по диапазону частот усиливаемых сигналов, называемому полосой пропускания. С этой точки зрения считается что, например, усилитель постоянного тока (УПТ) имеет полосу пропускания $\Delta f = (0 - 10^6)$ Гц, усилитель звуковых частот (УЗЧ) – $(20 - 20 \cdot 10^3)$ Гц, широкополосный усилитель – $(20 - 100 \cdot 10^6)$ Гц.

Усилители с линейным режимом работы предназначены для получения выходного сигнала, близкого по форме к входному, т.е. мгновенные значения выходного электрического сигнала должны быть пропорциональны мгновенным значениям входного сигнала (чаще всего это синусоидальные сигналы).

В усилителях с нелинейным режимом работы мгновенные значения входного и выходного сигналов не пропорциональны. К ним относятся усилители-ограничители, нелинейные импульсные усилители, ключевые схемы.

В зависимости от характера нагрузки и назначения различают усилители напряжения (УН), усилители тока (УТ), усилители мощности (УМ), однако в конечном итоге в усилителях преобразуется (усиливается) мощность.

Простейшую часть усилительного устройства часто называют усилительным каскадом (рис. 7.2), а цепь, в которую включен каскад, трактом (рис. 7.3).

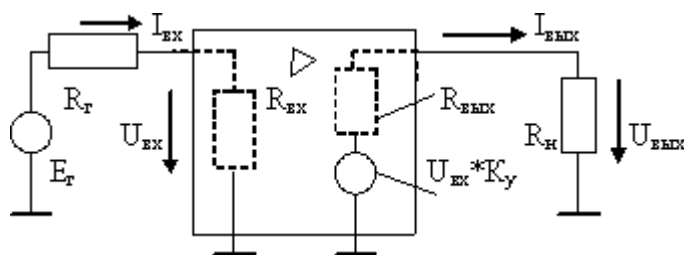


Рис. 7.2. Структурная схема включения каскада в усилительный тракт

Каждый усилительный каскад выполняет свою функцию. Различают каскады входные (предварительного усиления), промежуточные, выходные.

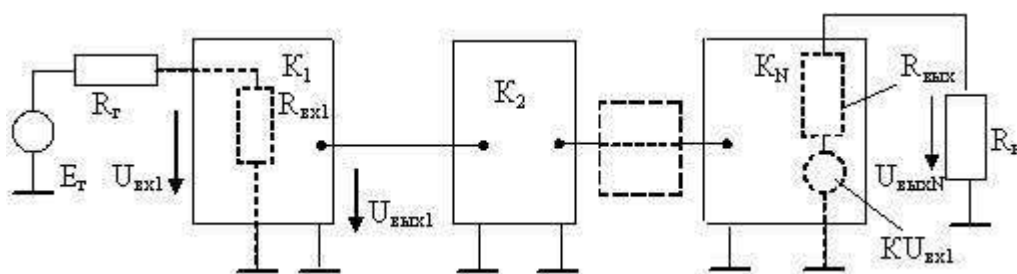


Рис. 7.3. Каскадное соединение усилительных каскадов

Первый каскад – входной, осуществляет согласование усилителя с источником входного сигнала E_T , имеющим внутреннее сопротивление R_T . Согласование – это приведение в соответствие возможностей источника и параметров нагрузки. Каскад имеет входное сопротивление $R_{ВХ1}$ и коэффициент усиления K_1 . Нагрузкой первого каскада служит входное сопротивление второго каскада и т.д.

Промежуточные каскады обеспечивают усиление полезного сигнала до величины, необходимой для выходного каскада. Выходной каскад обеспечивает передачу требуемого тока, напряжения или мощности в нагрузку R_H . Если соединение каскадов осуществлено так, что пропускается и постоянная, и переменная составляющие сигнала, усилитель называется усилителем с непосредственной (гальванической) связью. Примером может быть усилитель постоянного тока (УПТ). Если связь осуществлена так, что постоянная составляющая не пропускается на выход, то такие усилители называются усилителями переменного тока. Межкаскадные связи могут быть осуществлены через RC-цепи, трансформаторы, LC-цепи.

Со стороны входных зажимов усилитель характеризуется входным сопротивлением

$$R_{ВХ} = \Delta U_{ВХ} / \Delta I_{ВХ}.$$

Величина $R_{ВХ}$ различна в различных режимах, поэтому для источников входного сигнала возможны следующие режимы:

а) режим холостого хода (ХХ), когда $R_{\Gamma} \ll R_{BX}$;

б) режим короткого замыкания (КЗ), когда $R_{\Gamma} \gg R_{BX}$;

в) согласованный режим, когда $R_{\Gamma} = R_{BX}$, такой режим обеспечивают в усилителях мощности, так как в этом случае происходит наибольшая передача мощности [24].

Со стороны выходных зажимов усилитель (или любой каскад) можно представить зависимым источником напряжения $E = K \cdot U_{BX}$

и выходным сопротивлением $R_{ВЫХ}$. В зависимости от соотношения выходного сопротивления и сопротивления нагрузки R_H для выходной цепи также различают три режима:

а) ХХ_{ВЫХ}, когда $R_{ВЫХ} \ll R_H$;

б) КЗ_{ВЫХ}, когда $R_{ВЫХ} \gg R_H$;

в) согласованный, когда $R_{ВЫХ} = R_H$.

7.2. Основные параметры и характеристики усилителей

Технические характеристики усилительных устройств определяют степень усиления полезных сигналов, зависимости параметров усилителя от частоты синусоидальных входных воздействий, шумовые характеристики. К основным параметрам усилителя относят следующие величины.

1. Коэффициент усиления (передачи, преобразования) по напряжению:

$$K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}, \quad (7.1)$$

где $U_{ВЫХ}$, $U_{ВХ}$ – амплитудные или действующие значения выходного и входного переменных напряжений.

Часто определяют коэффициент усиления как $K = U_{ВЫХ} / E_{\Gamma}$. При последовательном соединении каскадов (рис. 7.3) общий коэффициент усиления $K_U = U_{ВЫХN} / U_{ВХ1}$ определяется произведением коэффициентов усиления каскадов:

$$K_U = (U_{ВЫХ1} / U_{ВХ1}) \cdot (U_{ВЫХ2} / U_{ВХ2}) \cdot \dots \cdot (U_{ВЫХN} / U_{ВХN}),$$

$$K_U = K_{U1} \cdot K_{U2} \cdot \dots \cdot K_{UN}. \quad (7.2)$$

Обычно коэффициент усиления усилителя оценивается в децибелах (дБ):

$$K_{U, дБ} = 20 \lg(U_{ВЫХ} / U_{ВХ}) = 20 \lg K_U.$$

Соответствие значений коэффициентов в относительных единицах (о.е.) и в децибелах показано в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Соответствие относительных единиц и децибел

K_U , о.е.	1,258	$2^{1/2}$	2	3,16	10	31,6	10^2	10^3	10^4	10^5

K_U , дБ	2	3	6	10	20	30	40	60	80	100

Выражение K_U в децибелах позволяет определять результирующий K_U для нескольких последовательно соединенных каскадов сложением коэффициентов, а не умножением их:

$$K_{U, \text{дБ}} = K_{U1, \text{дБ}} + K_{U2, \text{дБ}} + \dots + K_{UN, \text{дБ}}.$$

2. Коэффициент усиления по току:

$$K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}} \text{ или } K_{I, \text{дБ}} = 20 \lg K_I. \quad (7.3)$$

Коэффициенты усиления по току и напряжению, определяемые для гармонических входных воздействий, как правило, рассматриваются в виде комплексных величин, зависящих от частоты – $K(j\omega)$ или $\underline{K}(\omega)$.

3. Мощность на выходе (выходная мощность) – $P_{\text{ВЫХ}}$.

4. Коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} \text{ или } K_{P, \text{дБ}} = 10 \lg (P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}}) = 10 \lg K_P. \quad (7.4)$$

5. Коэффициент преобразования (передачи) – более общее понятие, частным случаем которого является коэффициент усиления, это отношение величины выходного сигнала к величине входного, например:

$S = I_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$ – коэффициент преобразования напряжения $U_{\text{ВХ}}$ в ток $I_{\text{ВЫХ}}$; $W = P_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}$ – коэффициент преобразования тока в мощность.

6. Динамический диапазон усиления:

$$D = U_{\text{ВХ MAX}} / U_{\text{ВХ MIN}}; D, \text{ дБ} = 20 \lg D.$$

Это отношение наибольшего допустимого входного напряжения к его наименьшему значению: $U_{\text{ВХ MAX}}$ – ограничено сверху возникновением искажений на выходе; $U_{\text{ВХ MIN}}$ – ограничено снизу уровнем собственных шумов, когда уже невозможно различить шум и полезный сигнал.

7. Коэффициент полезного действия (КПД) – это отношение выходной мощности, отдаваемой усилителем в нагрузку, к общей мощности, потребляемой от источника питания:

$$\eta = P_{\text{ВЫХ}} / P_0.$$

КПД характеризует энергетические показатели усилителя.

8. Напряжение шумов и помех усилителя.

Наличие шумов на выходе усилителя при отсутствии входного сигнала объясняется несколькими причинами:

- тепловым шумом сопротивлений, обусловленным хаотическими движениями носителей заряда в проводнике, находящимся при температуре выше абсолютного нуля;
- шумами электронных приборов, также обусловленными тепловым действием и неоднородностями структуры;
- шумами, создаваемыми за счет пульсаций напряжения источников питания.

Шумовые свойства оценивают коэффициентом шума:

$$F = \frac{P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ШВЫХ}}}{P_{\text{ИСТ}} / P_{\text{ШИСТ}}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ИСТ}}} \cdot \frac{P_{\text{ШИСТ}}}{P_{\text{ШВЫХ}}} \quad (7.5)$$

Коэффициент шума показывает во сколько раз ухудшается отношение сигнал/шум на выходе усилителя по сравнению с отношением сигнал/шум источника сигнала.

Ввиду того, что коэффициенты усиления – величины комплексные, важнейшими характеристиками усилителей являются амплитудные, амплитудно-частотные (АЧХ), фазо-частотные (ФЧХ), амплитудно-фазо-частотные (АФЧХ) характеристики.

9. Амплитудная характеристика – это зависимость амплитудного значения напряжения первой гармоники выходного напряжения от амплитуды синусоидального входного напряжения (рис. 7.4).

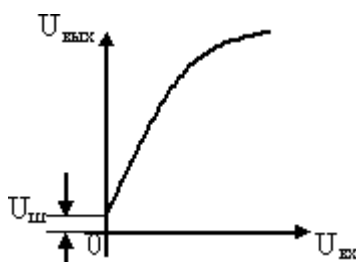


Рис. 7.4. Амплитудная характеристика усилителя ($U_{\text{Ш}}$ – напряжение шума)

10. АЧХ – это зависимость модуля комплексного коэффициента усиления $|K(f)|$ от частоты f входного сигнала (рис. 7.5, а).

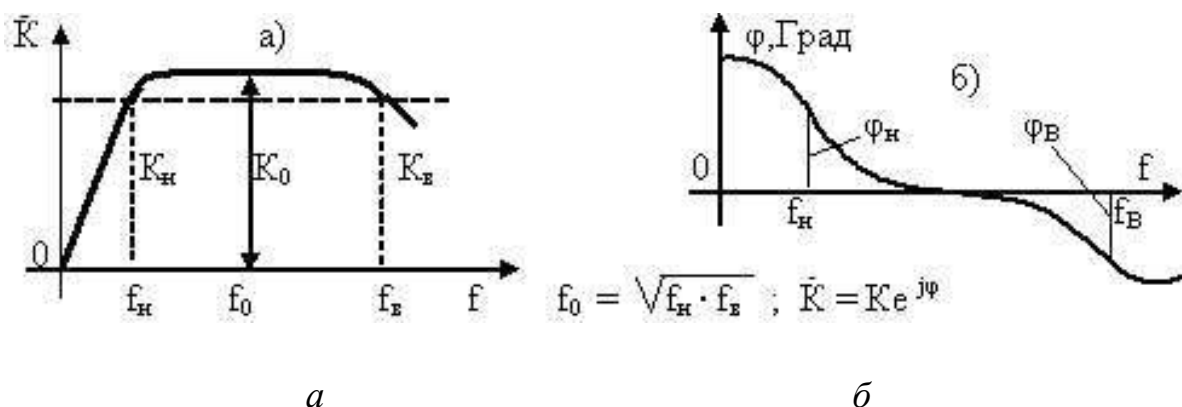


Рис. 7.5. АЧХ (а) и ФЧХ (б) усилителя переменного тока

11. ФЧХ – зависимость угла сдвига фазы φ между выходным и входным напряжениями от частоты f (рис. 7.5, б). На рис. 7.5 обозначено: K_0 – коэффициент усиления на средней частоте f_0 ; K_H , K_B – коэффициенты усиления на нижней (f_H) и верхней (f_B) границе полосы пропускания усилителя; φ_H , φ_B – фазовый сдвиг, соответственно на нижней и верхней частотной границе.

12. АФЧХ – это построенная на комплексной плоскости зависимость модуля коэффициента усиления $|K(f)|$ и угла сдвига фазы между входным и выходным напряжениями от частоты. АФЧХ объединяет АЧХ и ФЧХ (рис. 7.6).

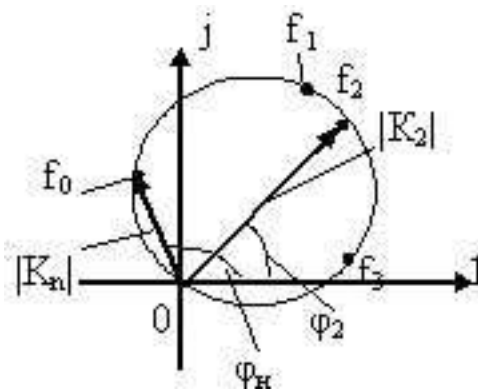


Рис. 7.6. АФЧХ усилителя переменного тока

АФЧХ представляет собой годограф вектора $K(f)$ на комплексной плоскости, длина которого соответствует модулю коэффициента усиления на данной частоте, а угол поворота относительно оси действительных чисел соответствует сдвигу фаз между входным и выходным сигналами.

Свойства усилителей по быстродействию характеризуются переходной характеристикой (ПХ).

13. ПХ – это зависимость от времени выходного напряжения усилителя, на вход которого подан мгновенный скачок напряжения $U_{вх}(t)$ (рис 7.7).

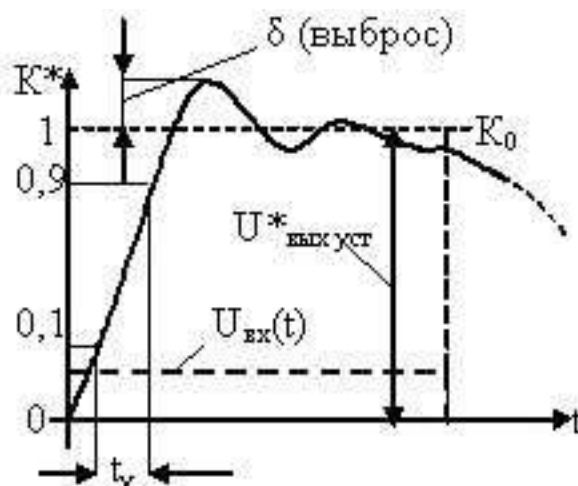


Рис. 7.7. Переходная характеристика усилителя

На рис. 7.7 обозначено: выброс δ – величина максимального превышения над установившимся значением; t_y – время установления от уровня $0,1 U_{ВЫХ УСТ}$ до уровня $0,9 U_{ВЫХ УСТ}$; K – относительный коэффициент усиления (за 1 принята величина

$$K = U_{ВЫХ} / U_{ВЫХ УСТ}).$$

14. Рабочий диапазон частот (полоса пропускания) – полоса частот от нижней f_H до верхней f_B , в пределах которой $K(f)$ не выходит за пределы заданных допусков. Часто рабочий диапазон частот определяют на уровне, меньшем максимального на 3 дБ, при этом K_U уменьшается на границах этого диапазона в $\sqrt{2}$ раз.

15. Коэффициенты частотных искажений. Частотные искажения обусловлены отклонением частотных характеристик от идеальных и приводят к искажениям формы сигналов. Коэффициенты частотных искажений M_H, M_B показывают уменьшение модуля коэффициента усиления относительно его среднего значения в области низких и высоких частот:

$$M_H = K_0 / K_H; M_B = K_0 / K_B, \quad (7.6)$$

$$M_H, \text{ дБ} = 20 \lg(K_0 / K_H); M_B, \text{ дБ} = 20 \lg(K_0 / K_B),$$

где K_0, K_H, K_B – коэффициенты (модули) усиления на средних, низких и высоких частотах. K_0 обычно определяют для частоты $f_0 = \sqrt{f_H \cdot f_B}$.

Неравномерность АЧХ – выраженное в процентах максимальное отклонение коэффициента усиления в заданной полосе частот от заданного значения, также характеризует частотные свойства усилителя:

$$\delta(\%) = \Delta K_{MAX} / K_0 \cdot 100 \, \%.$$

16. Фазовые искажения обусловлены отличием ФЧХ от идеальной и вызываются неодинаковым сдвигом по фазе отдельных гармонических составляющих спектра сигнала сложной формы. Фазовые искажения возникают из-за наличия в схемах усилителей реактивных (ёмкостных, индуктивных) сопротивлений элементов схемы и инерционности полупроводниковых приборов. Существуют теоретические условия усиления (передачи) сигнала без искажения его формы [21]. Пусть входной сигнал есть сумма m гармонических составляющих:

$$U_{BX} = \sum_{n=1}^m U_{n \text{ MAX}} \sin(n\omega t + \phi_n),$$

где n – номер гармоники;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

ϕ_n – начальный фазовый сдвиг n -й гармоники.

Если усилитель, который одинаково усиливает амплитуды гармоник с коэффициентом K , на частоте n -й гармоники вносит фазовый сдвиг, зависящий от частоты гармонической составляющей как

$\phi_n = n\omega\tau$, где τ – время сдвига, причём $\tau = \text{Const}$, то

$$U_{BIX} = K \times \sum_{n=1}^m U_{n \text{ MAX}} \sin(n\omega(t + \tau) + \phi_n). \quad (7.7)$$

Отсюда следует, что входное и выходное напряжения отличаются лишь временем сдвига τ , а форма их сохраняется неизменной.

Таким образом, форма сигнала не искажается, если фазовый сдвиг, вносимый усилителем, изменяется прямо пропорционально частоте. Идеальной ФЧХ является прямая, проходящая под углом к горизонтальной оси. Мерой фазовых искажений является разность ординат действительной и идеальной ФЧХ – $\Delta\varphi$ (рис. 7.8). Частотные и фазовые искажения относятся к линейным искажениям.

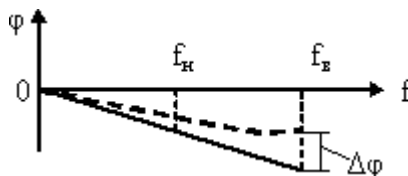


Рис. 7.8. Отклонение реальной ФЧХ (показана пунктиром) от идеальной

17. Наряду с линейными искажениями в усилительных устройствах присутствуют и нелинейные искажения, обусловленные нелинейностью амплитудной характеристики усилителя. Их оценивают либо коэффициентом нелинейных искажений $K_{НИ}$, либо коэффициентом гармоник K_G .

$$K_{НИ} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}},$$

$$K_G = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1}}, \quad (7.8)$$

где P_1 – мощность первой гармоники выходного сигнала;

P_n – мощность n -й гармоники выходного сигнала.

В обоих случаях в числителе подкоренного выражения стоит сумма мощностей гармоник с порядком, большим единицы.

7.3. Усилительные каскады на биполярных транзисторах

Принципы построения и действия различных каскадов поясним на примере структурной схемы для усилительного каскада на каком-либо усилительном элементе (УЭ).

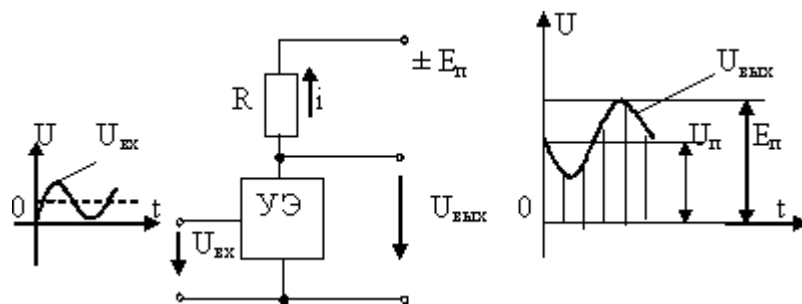


Рис. 7.9. Структурная схема усилительного каскада и осциллограммы сигналов на его входе и выходе

Основным элементом каскада (рис. 7.9) является управляемый (усилительный) элемент (УЭ) – это может быть, в частности, биполярный или полевой транзистор. Резистор R ограничивает ток источника питания E_{π} . Усиливаемый входной сигнал $U_{вх}$ подается на вход УЭ. Выходной сигнал снимается с выхода УЭ или резистора R . Выходной сигнал $U_{вых}$ создается в результате изменения сопротивления УЭ, т.е. в результате изменения тока i в выходной цепи под воздействием $U_{вх}$.

Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения E_{π} в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счет изменения внутреннего сопротивления УЭ по закону, задаваемому входным сигналом. Переменный ток и напряжение выходной цепи (пропорциональные току и напряжению входной цепи), следует рассматривать как переменные составляющие суммарного тока и напряжения, состоящего из постоянной и переменной составляющих.

Таким образом, для обеспечения работы усилительного каскада при переменном входном сигнале в его выходной цепи должны быть созданы постоянные составляющие тока I_{π} и напряжения U_{π} . Эти составляющие определяют режим покоя усилительного каскада. Параметры покоя по входной и выходной цепи характеризуют статический режим схемы при отсутствии входного сигнала. Если усилительный элемент – транзистор, то параметры усилительного каскада зависят от способа включения транзистора, выполняющего роль управляемого элемента. Для биполярных транзисторов различают три вида каскадов: с общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК), общей базой (ОБ).

Усилительный каскад с общим эмиттером (схема ОЭ). Упрощенная схема каскада с общим эмиттером показана на рис. 7.10.

В схеме эмиттерная цепь является общей для входного контура, образованного источником сигнала и цепью база-эмиттер транзистора, и для выходного контура, содержащего цепь коллектор-эмиттер транзистора, разделительный конденсатор C_{C2} и резистор R_H .

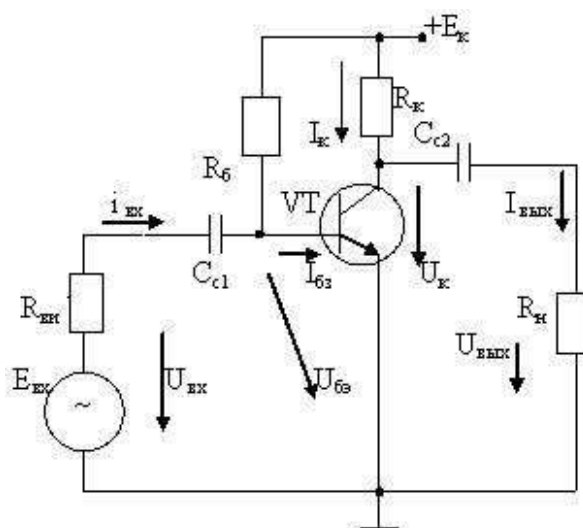


Рис. 7.10. Схема усилительного каскада с транзистором, включённым по схеме с общим эмиттером

Назначение и обозначения элементов в схеме (рис. 7.10):

E_K – ЭДС источника питания; U_K – напряжение на коллекторе;

$U_{БЭ}$ – напряжение между базой и эмиттером; $E_{ВХ}$ – ЭДС источника входного сигнала; $U_{ВХ}$, $U_{ВЫХ}$ – входное и выходное напряжение;

$R_{ВХ}$ – резистор в цепи источника сигнала; R_B – резистор для создания начального тока базы $I_{БЗ}$; R_K – резистор для ограничения тока в цепи коллектора; R_H – резистор нагрузки; C_{C1} – разделительный конденсатор на входе; C_{C2} – разделительный конденсатор на выходе;

$i_{ВХ}$, $I_{ВЫХ}$ – входной и выходной токи; I_K – коллекторный ток. Разделительный конденсатор на входе C_{C1} исключает прохождение постоянного тока от источника питания в цепь источника входного сигнала.

Конденсатор C_{C2} обеспечивает прохождение в резистор нагрузки переменной составляющей $U_{ВЫХ}$ коллекторного напряжения U_K , не пропуская в нагрузку постоянный ток от источника питания E_K . Величина E_K обычно составляет (5 – 30) В, а токи транзисторов малой мощности обычно не превышают несколько десятков миллиампер.

Для коллекторной цепи транзистора при отсутствии входного сигнала справедливо уравнение, называемое уравнением покоя выходной цепи:

$$E_K = U_K + R_K I_K. \quad (7.9)$$

Процесс усиления входного сигнала удобно представить графо-аналитическим способом, используя ВАХ транзистора. Подробное описание и иллюстрация такого способа представлены на рис. 7.11.

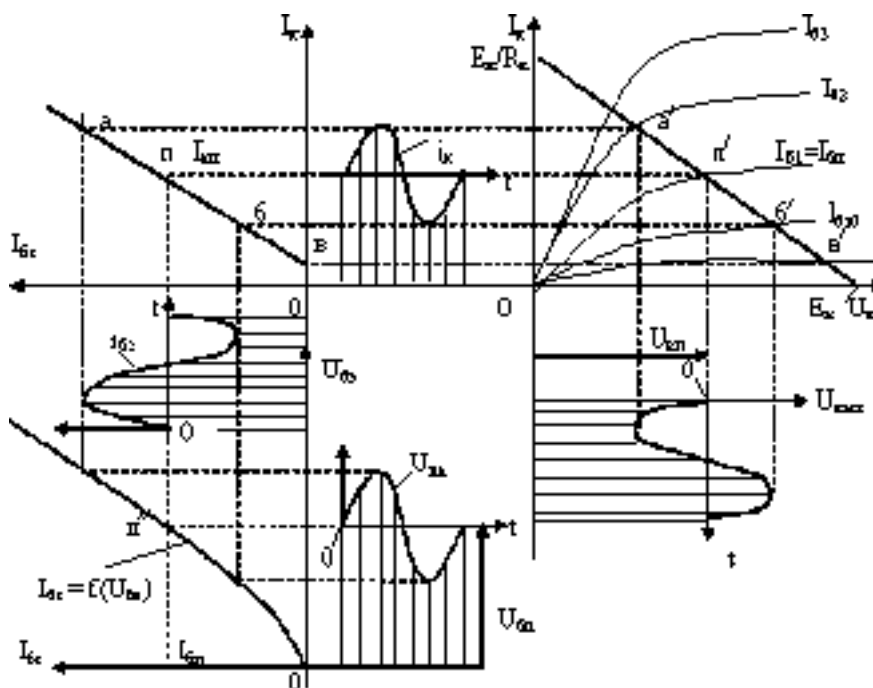


Рис. 7.11. Иллюстрация процесса усиления входного сигнала в схеме ОЭ

Для проведения анализа работы схемы, изображенной на рис. 7.10, уравнение (7.9) выходной цепи ($U_K = E_K - R_K I_K$) изобразим на плоскости выходных характеристик транзистора в виде прямой линии с координатами точек ($U_K = E_K, I_K = 0$) и ($U_K = 0, I_K = E_K / R_K$). Эта линия является вольт-амперной характеристикой (ВАХ) резистора R_K и называется линией нагрузки. Точки пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками дают графическое решение уравнения покая (7.9) для данного сопротивления R_K и различных значений тока базы I_{B3} .

Во втором квадранте строим характеристику $I_K = f(I_{B3})$ по точкам пересечения а', п', в'. Затем в третьем квадранте строим по току I_{B3} входную характеристику $I_{B3} = f(U_{BЭ})$, повернутую на 90° против часовой стрелки по сравнению с её обычным изображением.

Сопротивление резистора R_K выбирают, исходя из того, чтобы линия нагрузки располагалась ниже линий $I_{K \text{ MAX}}, U_{K \text{ MAX}}, P_{K \text{ MAX}}$. В то же время участок а'/в' должен быть достаточно протяженным.

Резистор R_B обеспечивает режим покоя базы. С помощью этого резистора можно выбрать положение точки п'' на линейном участке входной характеристики, при этом:

$$R_B = (E_K - U_{БП}) / I_{БП}. \quad (7.10)$$

При подаче на вход каскада переменного напряжения $U_{ВХ}(t)$ ток базы будет изменяться в соответствии с входной характеристикой и будет иметь постоянную и переменную составляющую. В транзисторе будут изменяться коллекторный и эмиттерный токи, а также коллекторное напряжение U_K . Переменная составляющая коллекторного напряжения $U_K(t) = U_{ВЫХ}$ будет по амплитуде значительно больше $U_{ВХ}$ и противоположна по фазе (рис. 7.11).

Если $U_{ВХ}(t)$ укладывается в линейный участок характеристики $I_{B3} = f(U_{BЭ})$, то искажений формы сигнала не будет. Если $U_{ВХ}(t)$ больше некоторого значения, появятся искажения формы – срезы, т.е. будут возникать нелинейные искажения. Оценку диапазона изменений входных напряжений, усиливаемых без искажения (динамического диапазона), делают по

амплитудной характеристике. Диапазон работы без искажений ограничивается линейным участком амплитудной характеристики (рис. 7.12, б).

При работе усилительного каскада в режиме, соответствующем линейным участкам характеристик, т.е. при отсутствии искажений, параметры усилителя можно рассчитать аналитически по

h -параметрам транзистора. Для этого используем схему замещения транзистора, включенного по схеме ОЭ, а в схеме каскада мысленно «закорачиваем» выводы конденсаторов и источника питания. Схема замещения приобретает вид, показанный на рис. 7.12, а.

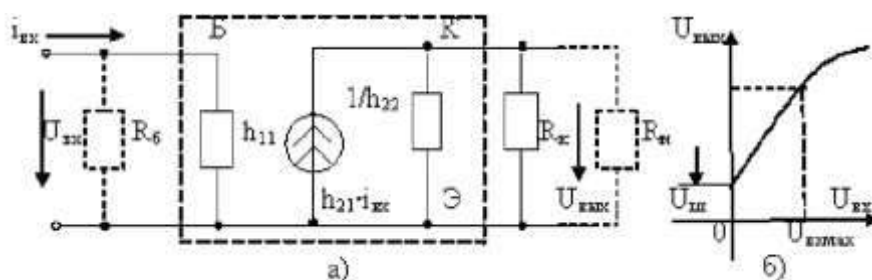


Рис. 7.12. Схема замещения каскада в h -параметрах (а) и определение диапазона неискаженной работы (б)

Система уравнений, соответствующая схеме замещения, имеет вид:

$$\begin{aligned} U_{BX} &= i_{BX} \cdot h_{11} \cdot R_B / (R_B + h_{11}); \\ U_{ВЫХ} / R_K + U_{ВЫХ} / R_H + h_{22} \cdot U_{ВЫХ} - h_{21} \cdot i_{BX} &= 0. \end{aligned} \quad (7.11)$$

Обычно $R_B \gg h_{11}$, $R_H \gg R_K$, тогда

$U_{BX} \approx i_{BX} \cdot h_{11}$; $h_{22} \cdot U_{ВЫХ} + U_{ВЫХ} / R_K \approx h_{21} \cdot i_{BX}$; откуда получим

$$U_{ВЫХ} = U_{BX} \cdot h_{21} / h_{11} \cdot 1 / (h_{22} + 1/R_K). \quad (7.12)$$

Определяем коэффициент усиления по напряжению, учитывая, что $R_K \cdot h_{22} \ll 1$. В этом случае

$$K_U = U_{ВЫХ} / U_{BX} = h_{21} / h_{11} \cdot R_K / (1 + R_K h_{22}) \approx R_K \cdot h_{21} / h_{11}; \quad (7.13)$$

$$R_{BX} = h_{11} \cdot R_B / (R_B + h_{11}) \approx h_{11}. \quad (7.14)$$

$$R_{ВЫХ} = R_K \parallel (1 / h_{22});$$

$$R_{ВЫХ} = R_K / h_{22} (R_K + 1 / h_{22}) = R_K / (1 + h_{22} R_K) \approx R_K. \quad (7.15)$$

Как правило, R_{BX} составляет сотни Ом – несколько кОм; $R_{ВЫХ}$ обычно больше R_{BX} .

Низкое входное сопротивление создает трудности в работе источника сигнала, если его внутреннее сопротивление велико. В этом случае образуется делитель напряжения входного сигнала, и лишь его малая доля попадает во входную цепь транзистора (рис. 7.10):

$$U_{BX} = e_{BX} \cdot R_{BX} / (R_{ВН} + R_{BX}) \ll e_{BX}.$$

При высоком выходном сопротивлении каскада требуется, чтобы сопротивление нагрузки R_H было еще больше, иначе существенно уменьшается коэффициент усиления по напряжению.

Если $R_H \ll R_K$, то $|K_U| = h_{21} / h_{11} \cdot (R_H \parallel R_K) \ll h_{21} / h_{11} \cdot R_K$.

Температурная стабилизация каскада ОЭ. С ростом температуры в полупроводнике увеличивается число неосновных носителей заряда, и в транзисторе увеличивается коллекторный ток I_K . С ростом I_K напряжение $U_K = E_K - R_K \cdot I_K$ уменьшается (рис. 7.13).

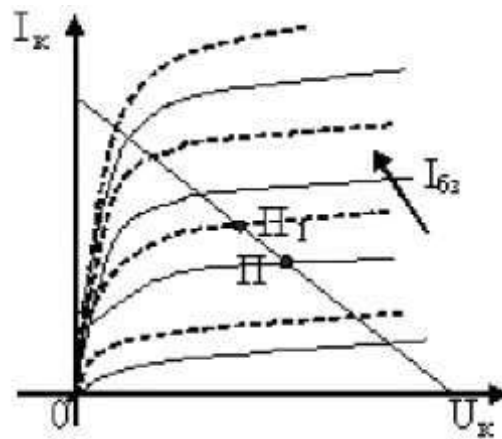


Рис. 7.13. Смещение точки покоя с ростом температуры

Со смещением точки покоя увеличивается вероятность искажений. Для уменьшения влияния температуры на характеристики каскада используют схемы температурной стабилизации (рис. 7.14).

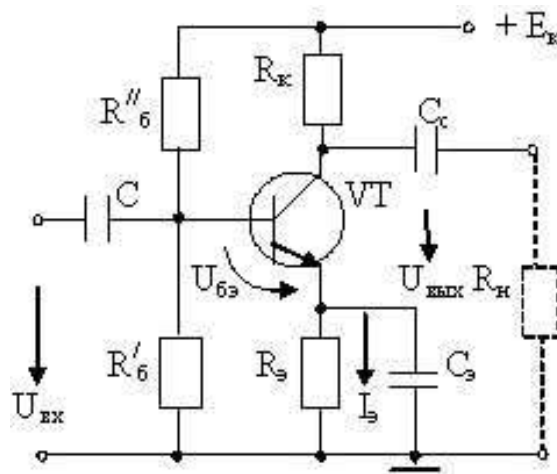


Рис. 7.14. Схема каскада ОЭ с эмиттерной термостабилизацией

Сопротивление $R_Э$ создаёт зависимость $U_{БЭ}$ от $I_Э$, однако при этом часть входного сигнала теряется из-за отрицательной обратной связи по току эмиттера. Включение $C_Э$ препятствует снижению коэффициента усиления.

Принцип температурной компенсации состоит в следующем.

В режиме покоя $U_{БЭ} = E_K R'_Б / (R'_Б + R''_Б) - R_Э I_Э$. Температурное увеличение тока $I_Э$ вызывает уменьшение управляющего транзистором напряжения $U_{БЭ}$, препятствующее этому увеличению. Исходное состояние транзистора сохраняется, однако часть коллекторного (выходного) напряжения теряется в виде падения напряжения на резисторе $R_Э$, что снижает коэффициент усиления схемы. При наличии входного сигнала $U_{БЭ} = U_{ВХ} - Z_Э I_Э$, где $Z_Э$ – эквивалентное сопротивление в цепи эмиттера. Если конденсатор $C_Э$ отсутствует, то $Z_Э = R_Э$ и коэффициент усиления для переменной составляющей выходного напряжения будет снижен. Если параллельно резистору $R_Э$ подключить конденсатор $C_Э$, имеющий сопротивление

$X_C = 1 / \omega C_3 \ll R_3$, то $Z_3 \ll R_3$ и снижение коэффициента усиления для переменной составляющей выходного напряжения будет небольшим.

Второй способ температурной стабилизации каскада ОЭ показан на рис. 7.15. В этой схеме ток базы определяется напряжением U_K (в отличие от первой схемы, где I_{B3} определяется E_K). Если в результате роста температуры увеличивается I_K , то U_K падает, уменьшается и ток базы, возвращая ток коллектора к исходному состоянию. Чтобы переменная составляющая U_K не попадала в базу, установлен конденсатор C_Φ , причём ёмкость C_Φ должна быть выбрана из условия $Z = 1 / 2\pi f_H C_\Phi = (R'_B + R'') / (10 \div 20)$, где f_H – низшая частота усиления.

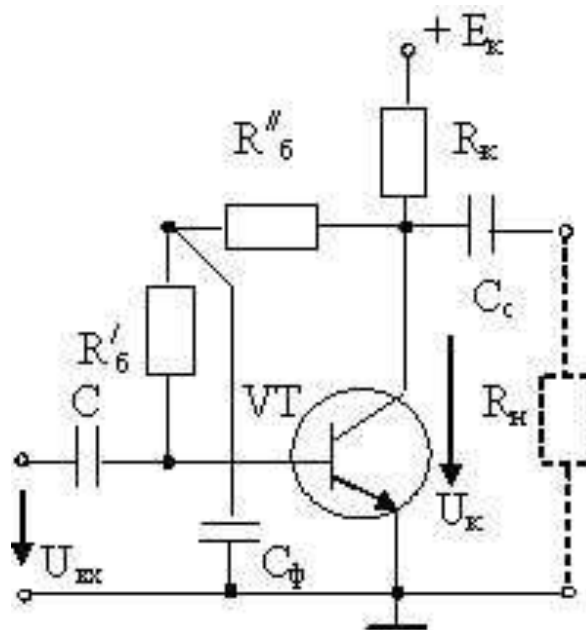


Рис. 7.15. Каскад ОЭ с коллекторной термостабилизацией

Эта схема обладает меньшей стабильностью, чем предыдущая, однако в ней отсутствует снижение $U_{ВЫХ}$ за счет потери в R_3 , что было в схеме с эмиттерной стабилизацией. Ёмкость конденсатора C_Φ в этой схеме оказывается значительно меньшей, чем в предыдущей.

Усилительный каскад с общим коллектором (эмиттерный повторитель, схема ОК). Схема каскада с общим коллектором показана на рис. 7.16. В этом усилительном каскаде основной резистор, с которого снимается $U_{ВЫХ}$, включён в эмиттерную цепь, а коллектор соединён с общей точкой схемы по переменной составляющей сигнала, так как внутреннее сопротивление источника E_K близко к нулю. В режиме покоя резистор R_B создаёт начальный ток смещения в цепи базы. Его значение выбирают так, чтобы рабочая точка в режиме покоя на входной характеристике находилась примерно в середине её линейного участка.

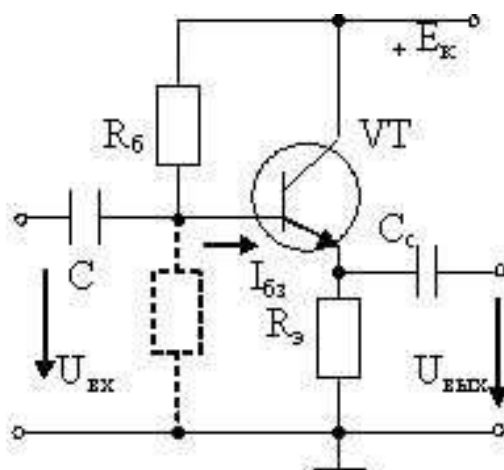


Рис. 7.16. Схема каскада с общим коллектором

Для определения основных характеристик усилительного каскада с ОК рассмотрим его схему замещения в h -параметрах (рис. 7.17). Система уравнений, описывающих схему имеет вид:

$$h_{21} i_{BX} + i_{BX} - U_{BЫX} / R_{Э} - U_{BЫX} h_{22} = 0;$$

$$U_{BX} = i_{BX} h_{11} + U_{BЫX}.$$

Решая систему относительно $U_{BЫX}$, получим:

$$U_{BЫX} = U_{BX} / \{1 + h_{11}(1 + h_{22}R_{Э}) / [(1 + h_{21})R_{Э}]\}.$$

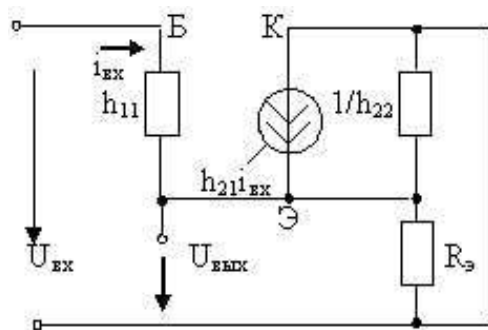


Рис. 7.17. Схема замещения эмиттерного повторителя в h -параметрах

Определяем коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{BЫX} / U_{BX}$.

$$K_U = 1 / \{1 + h_{11}(1 + h_{22}R_{Э}) / [(1 + h_{21})R_{Э}]\}. \quad (7.16)$$

По выражению (7.16) видно, что $K_U < 1$.

Учитывая, что обычно $R_{Э} = (10^2 - 10^4)$ Ом, а $h_{22} \cdot R_{Э} \ll 1$, выражение (7.16) можно преобразовать к виду:

$$K_U = 1 / [1 + h_{11} / (1 + h_{21}) \cdot R_{Э}]. \quad (7.17)$$

В схеме эмиттерного повторителя фазы входного и выходного сигналов совпадают, а входное и выходное напряжения близки по значению, поэтому схема и получила своё название. Определяем входное сопротивление схемы:

$$R_{BX} = U_{BX} / i_{BX} = U_{BX} / (U_{BX} - U_{BЫX}) \cdot h_{11} = h_{11} / (1 - K_U). \quad (7.18)$$

Анализ выражения (7.18) показывает, что $R_{BX} \gg h_{11}$ и может достигать несколько сотен кОм. Большое входное сопротивление – достоинство эмиттерного повторителя. Для определения выходного сопротивления используем схему замещения каскада ОК в виде, представленном на рис. 7.18.

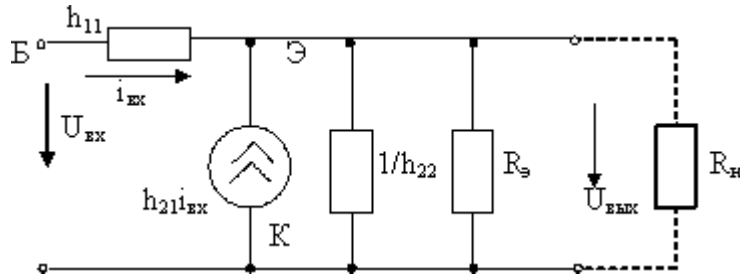


Рис. 7.18. Вариант схемы замещения эмиттерного повторителя

Выходное сопротивление, согласно [11], определяется как отношение напряжения холостого хода схемы (при отключенном сопротивлении нагрузки) к току короткого замыкания на выходе $R_{BЫX} = U_{XX} / i_{K3}$.

Уравнения, описывающие схему в режимах холостого хода (XX) и короткого замыкания (КЗ) на выходе, имеют вид:

- в режиме КЗ: $i_{K3} = i_{BX} + h_{21} \cdot i_{BX} = i_{BX} (1 + h_{21})$, или $i_{K3} = U_{BX} / h_{11} (1 + h_{21})$;
- в режиме XX: $U_{XX} = U_{BX} - i_{BX} \cdot h_{11}$.

$$R_{BЫX} = h_{11} \cdot (1 - h_{11}/R_{BX}) / (1 + h_{21}) \quad (7.19)$$

Учитывая, что $R_{BX} \gg h_{11}$, получим $R_{BЫX} \approx h_{11}/(1 + h_{21})$.

Выходное сопротивление эмиттерного повторителя имеет величину порядка десятков Ом, что также является достоинством каскада.

Таким образом, эмиттерный повторитель обладает высоким входным и малым выходным сопротивлениями. Следовательно, его коэффициент усиления по току может быть высоким. Эмиттерный повторитель обычно используют для согласования высокоомного источника усиливаемого сигнала с низкоомным нагрузочным устройством.

Температурная стабильность каскада обеспечивается основным резистором $R_{Э}$, включенным в эмиттерную цепь, подобно тому, как это было выполнено в схеме каскада с ОЭ (по принципу эмиттерной стабилизации – рис. 7.14).

Усилительный каскад с общей базой (схема ОБ). Схема каскада с общей базой показана на рис. 7.19. В схеме ОБ для создания режима покоя, при котором работа обеспечивается на линейном участке характеристики, используются резисторы R_B и R'_B . Конденсатор C_B имеет на усиливаемой частоте сопротивление $1/2\pi f C_B \ll R_B$, поэтому падение переменной составляющей на этой параллельной цепочке мало и можно считать, что база соединена с общей точкой схемы.

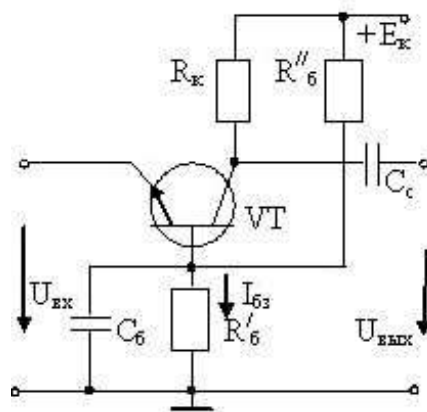


Рис. 7.19. Схема усилительного каскада с общей базой

Усиливаемый сигнал (входное напряжение U_{BX}) подается между базой и эмиттером. Через конденсатор связи C_C с коллектора снимается переменное выходное напряжение $U_{ВЫХ}$.

Каскад с общей базой имеет коэффициент усиления по напряжению примерно такой же, как в схеме с ОЭ. Однако коэффициент усиления по току гораздо ниже, так как входной ток – эмиттерный, а выходной – коллекторный. Коэффициент усиления по мощности меньше, чем в схемах ОЭ и ОК. Каскад ОБ имеет малое входное сопротивление и высокое выходное сопротивление. По указанным причинам этот каскад используется редко.

7.4. Усилительные каскады на полевых транзисторах

Каскад с общим истоком (ОИ). Схема каскада с общим истоком на полевом транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом показана на рис. 7.20. Звено $R_{II}C_{II}$ обеспечивает отрицательное смещение на затворе $З$ относительно истока $И$. Резистор R_3 соединяет затвор с общей шиной и предназначен для стабилизации входного сопротивления каскада, причём $R_3 \approx 1$ МОм и на 1 – 2 порядка меньше входного сопротивления транзистора.

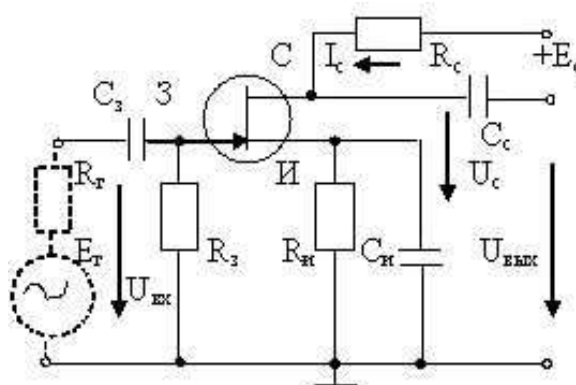


Рис. 7.20. Схема усилительного каскада ОИ на полевом транзисторе

Резистор R_C служит для ограничения тока и на нем выделяется усиленное переменное напряжение. Схема замещения усилительного каскада с ОИ для переменного тока имеет вид,

представленный на рис. 7.21. Пунктирным контуром охвачена схема замещения полевого транзистора.

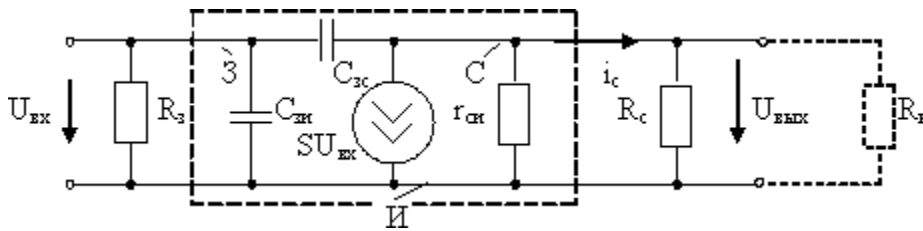


Рис. 7.21. Схема замещения каскада ОИ для переменного тока

В схеме замещения (рис. 7.21) элементы R_{II} и C_{II} , показанные в схеме на рис. 7.20, отсутствуют, так как предполагается, что емкость C_{II} достаточно велика и «закорачивает» цепь R_{II} по переменному току. $C_{ЗС}$, $C_{ЗН}$ – конденсаторы, учитывающие наличие ёмкости между затвором и стоком и между затвором и истоком.

Основными параметрами каскада являются: входное сопротивление $R_{ВХ} \approx R_З$; коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}$.

$$K_U = S U_{ВХ} r_{СИ} R_C / (R_C + r_{СИ}) / U_{ВХ} = S r_{СИ} R_C / (R_C + r_{СИ}), \quad (7.20)$$

где S – крутизна характеристики транзистора;

$r_{СИ}$ – внутреннее сопротивление транзистора между стоком и истоком.

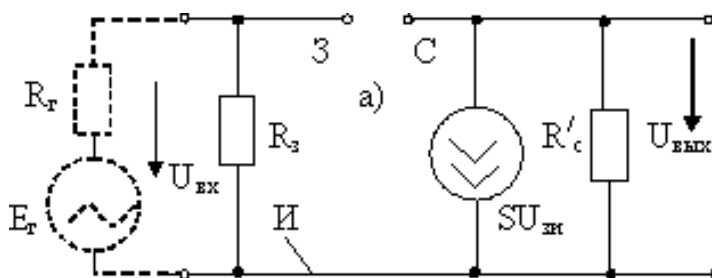
Если учесть, что $R_C \ll r_{СИ}$, то

$$K_U \approx S R_C. \quad (7.21)$$

Выходное сопротивление каскада:

$$R_{ВЫХ} = R_C \parallel r_{СИ} \approx R_C. \quad (7.22)$$

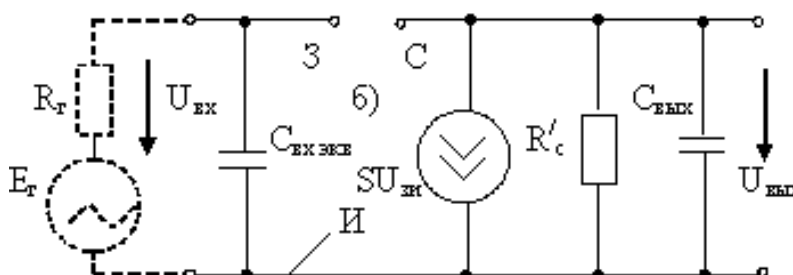
Часто используют упрощенные эквивалентные схемы каскадов. Например, в приближённых расчетах применяют упрощенные эквивалентные схемы для сигналов средних и высоких частот (рис. 7.22).



$$S = 1 / g_{21};$$

$$r_{СИ} = 1 / g_{22},$$

$$R'_С = r_{СИ} / R_C$$



$$C_{ВХВ} = C_{ЗН} + C_{ЗС} (1 + K_U);$$

$$C_{ВЫХ} = C_{ЗС};$$

$$K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}$$

Рис. 7.22. Упрощённые схемы замещения каскада ОИ для сигналов средних (а) и высоких (б) частот

Анализ работы усилительного каскада на полевом транзисторе с общим истоком удобно провести графоаналитическим способом с помощью стоковых характеристик $I_C = f(U_C)$.

Уравнение для цепи стока и истока в режиме покоя (рис. 7.20) имеет вид: $E_C = U_C + R_C I_C$, откуда

$$I_C = (E_C - U_C) / R_C. \quad (7.23)$$

Аналогично методике, изложенной выше, в области выходных характеристик (рис. 7.23) в первом квадранте координатной плоскости проводим линию нагрузки. Стоко-затворную характеристику размещаем во втором квадранте в соответствии с положением точек пересечения нагрузочной линии с выходными характеристиками. Выбираем исходное положение характеристической (рабочей) точки (П, П' на рис. 7.23). Построение графика выходного напряжения $U_{ВЫХ}(t)$ следует начинать с построения графика входного напряжения $U_{ВХ}(t)$ в третьем квадранте рис. 7.23.

Анализ графиков изменения входного $U_{ВХ}(t)$ и выходного $U_{ВЫХ}(t)$ напряжений показывает, что направления их изменений противоположны (противофазны).

Вследствие большого разброса параметров и влияния температуры для полевых транзисторов, как и для биполярных, необходима стабилизация положения рабочей точки на характеристиках транзистора (точки П, П' на рис. 7.23).

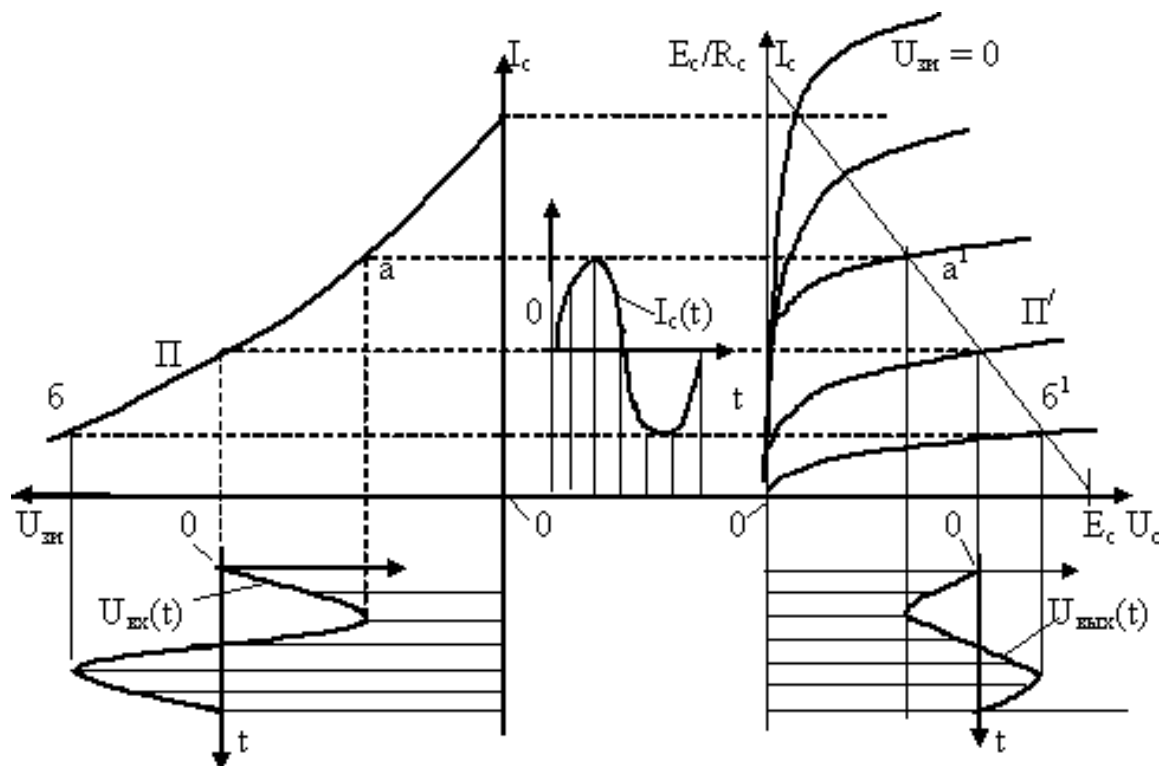


Рис. 7.23. Иллюстрация к графоаналитическому анализу работы усилительного каскада с общим истоком (ОИ)

Стабилизация достигается включением в цепь истока резистора R_{II} (рис. 7.20), сопротивление которого выбирается несколько большим, чем нужно для создания смещения. Для компенсации излишнего смещения на входе включают высокоомный резисторный делитель.

Истоковый повторитель (схема усилительного каскада с общим стоком). Истоковый повторитель аналогичен эмиттерному повторителю, собранному на биполярном транзисторе. Схемы каскадов с общим стоком показаны на рис. 7.24.

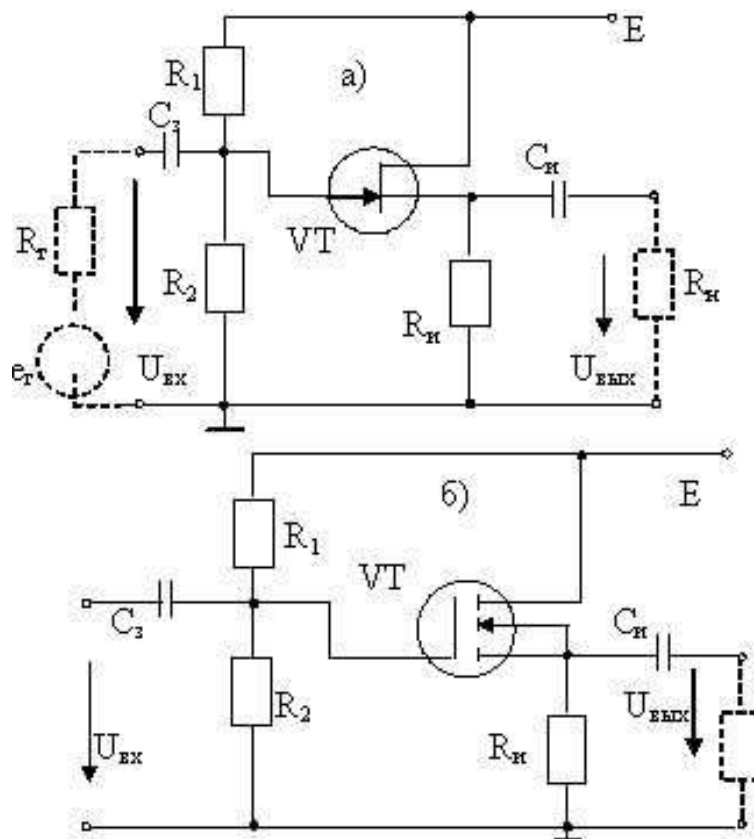


Рис. 7.24. Схемы истоковых повторителей на полевых транзисторах

Каскад (рис. 7.24, а) выполнен на транзисторе с управляющим p – n -переходом (с каналом n -типа). Каскад (рис. 7.24, б) выполнен на МДП-транзисторе с индуцированным каналом n -типа. Резисторный делитель напряжения R_1 , R_2 обеспечивает смещение на затворе.

Методика расчёта параметров истокового повторителя аналогична методике расчёта параметров эмиттерного повторителя. Эквивалентная схема показана на рис. 7.25.

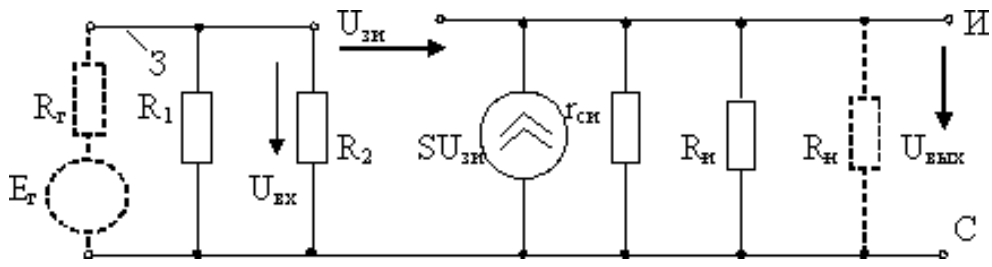


Рис. 7.25. Эквивалентная схема истокового повторителя

Эквивалентная схема показана для средних частот, как наиболее простая. Аналитические выражения для определения параметров приведены ниже (S – крутизна характеристики транзистора):

$$\begin{aligned}
 U_{ВЫХ} &= S U_{3И} \cdot R'_И; R'_И = (r_{СИ} \parallel R_И \parallel R_H); \\
 U_{ВХ} &= U_{3И} (1 + S \cdot R'_И); \\
 K_U &= U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = S \cdot R'_И / (1 + S \cdot R'_И); \\
 R_{ВХ} &= R_1 \parallel R_2; R_{ВЫХ} \approx 1/S; K_I = K_U (R_1 \parallel R_2) / R_H.
 \end{aligned}
 \tag{7.24}$$

7.5. Режимы работы усилительных каскадов

Различают три основных режима работы усилительных каскадов (три класса усиления): А, В, С [12]. Основные параметры этих режимов – нелинейные искажения и коэффициент полезного действия. Параметры класса усиления зависят от исходного состояния усилительного каскада, отражаемого положением рабочей точки на выходных характеристиках и от уровня входного усиливаемого сигнала.

Режим А характеризуется тем, что рабочую точку в режиме покоя выбирают на линейном участке (чаще всего посередине) выходной и переходной (сквозной) характеристик транзистора. Сквозная характеристика для биполярного транзистора – это зависимость выходного (коллекторного) тока от входного тока (тока базы).

Для полевого транзистора сквозная характеристика – это, например, зависимость тока стока от управляющего напряжения между затвором и истоком. Уровень (амплитуда) входного сигнала в режиме А должен быть таким, чтобы работа усилительного каскада происходила на линейном участке характеристики. В этом случае искажение формы выходного сигнала по сравнению с формой входного будут минимальными. Однако этот режим имеет низкий КПД, который вычисляется как отношение выходной (полезной) мощности $P_{ВЫХ}$ к мощности источника питания P_0 :

$$\eta = (P_{ВЫХ} / P_0) 100 \%.
 \tag{7.25}$$

Соотношение между мощностями удобно выявить, используя графическое представление процесса усиления входного сигнала в усилительном каскаде (рис. 7.11) Соответствующие построения показаны на рис. 7.26 и 7.27.

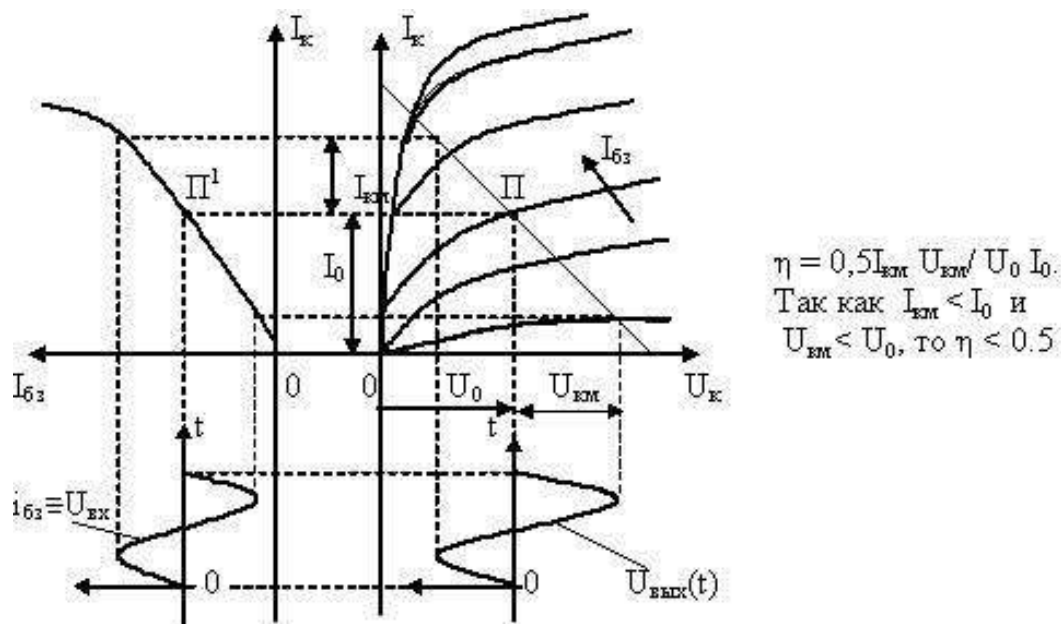


Рис. 7.26. Выбор положения рабочей точки на характеристиках каскада ОЭ в классе усиления А

Постоянные составляющие напряжения U_0 и тока I_0 определяют исходное положение рабочей точки П. Потребляемая мощность равна произведению постоянных составляющих коллекторных напряжений и токов $P_0 = U_0 I_0$. Для синусоидальных величин выходная мощность

$$P_{ВЫХ} = 0,5 U_{KM} I_{KM},$$

где U_{KM} , I_{KM} – амплитуды коллекторных напряжений и токов. Следовательно, КПД каскада в режиме А (рис. 7.26) согласно (7.25) не может быть больше 50 %.

Режим В характеризуется тем, что рабочую точку П выбирают в начале переходной характеристики (в точке отсечки) (рис. 7.27, а). В этом режиме переменные составляющие тока и напряжения транзистора возникают лишь в положительные полупериоды входного напряжения.

При синусоидальном входном сигнале будем иметь на выходе полупериод синусоиды, т.е. большие искажения. Режим В будет иметь более высокий КПД по сравнению с режимом А, так как ток покоя I_0 мал, несмотря на то, что U_0 больше ($\eta \approx 80 \%$). Иногда используют режим АВ, при котором рабочая точка занимает промежуточное положение.

Однотактный усилительный каскад. Принципиальная схема однотактного усилительного каскада с трансформаторным согласованием нагрузки приведена на рис. 8.1. Утолщёнными линиями условно изображены обмотки трансформатора TV: первичная обмотка включена в цепь коллектора транзистора VT, к вторичной обмотке подключено сопротивление нагрузки R_H .

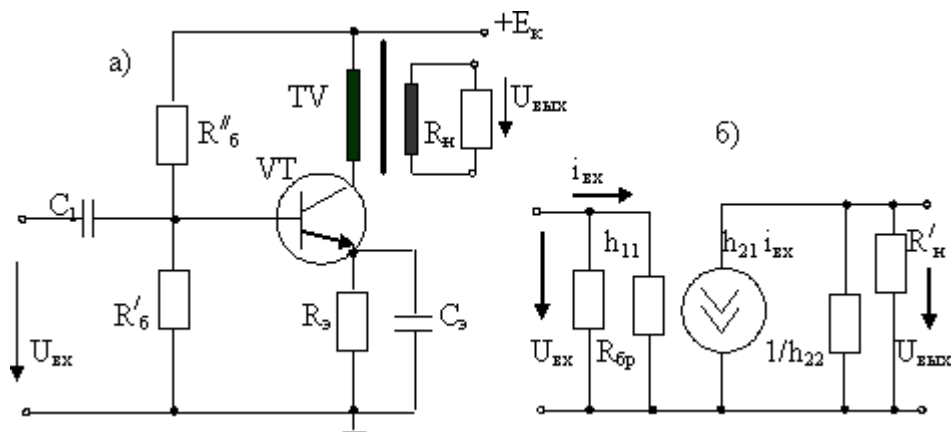


Рис. 8.1. Однотактный усилитель мощности (а) и его упрощенная схема замещения (б)

В схеме усилителя элементы R'_B , R''_B , R_3 , C_2 обеспечивают выбранный режим по постоянному току и его температурную стабилизацию. Трансформатор TV согласует сопротивление резистора нагрузки R_H с выходным сопротивлением транзисторного каскада $R_{ВЫХ}$ и формирует усиленные ток и напряжение, а также гальванически отделяет цепь нагрузки и цепи каскада. В схеме замещения резистор $R_{БП}$ – эквивалентное сопротивление делителя напряжения, обеспечивающего нужное смещение на базе транзистора; R'_H – эквивалентное сопротивление нагрузки: $R'_H = n^2 R_H$, где $n = W1/W2$ – коэффициент трансформации трансформатора TV; $W1$, $W2$ – числа витков первичной (коллекторной) и вторичной обмоток. Усилитель используется чаще всего в режиме А во избежание больших искажений. Недостаток схемы – завышенная мощность трансформатора из-за подмагничивания магнитного сердечника трансформатора постоянным током коллектора.

Двухтактный трансформаторный усилитель мощности. Усилитель состоит из двух симметричных плеч (рис. 8.2). Транзисторы VT1, VT2 подбирают с максимально близкими параметрами. Каждый из транзисторов работает противофазно. Входной трансформатор TV_{ВХ} обеспечивает получение одинаковых по модулю, но противоположных по фазе входных напряжений. Выходной трансформатор TV_{ВЫХ} суммирует переменные выходные токи и напряжения транзисторов. R_1 , R_2 – делитель, обеспечивающий заданное положение рабочей точки (смещение) транзисторов. В этой схеме, в отличие от однотактной, отсутствует подмагничивание выходного трансформатора постоянным током. Это благоприятно сказывается на форме выходного сигнала и других показателях.

Особенно эффективен режим В, когда каждый из транзисторов участвует в формировании выходного напряжения только в течение одного полупериода. Транзисторы работают поочередно, образуя гармоническое выходное напряжение из двух полуволн.

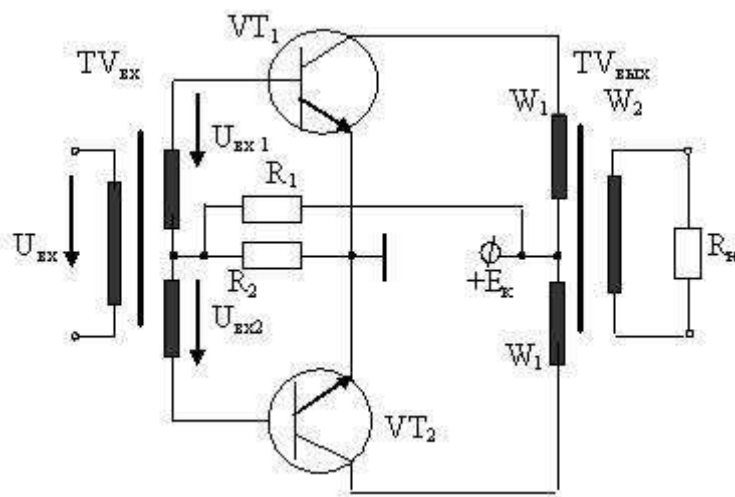


Рис. 8.2. Схема двухтактного трансформаторного усилителя мощности

Основные достоинства схемы: гальваническое разделение входных и выходных цепей, высокий КПД. Недостаток – сложность, обусловленная необходимостью использования двух трёхобмоточных трансформаторов и трудность обеспечения симметрии в схеме.

8.2. Безтрансформаторные двухтактные усилители

Безтрансформаторные двухтактные усилители используются в выходных каскадах электронных устройств. На схеме рис. 8.3 показан усилитель на двух одинаковых биполярных транзисторах.

Транзисторы управляются двумя противофазными сигналами U_{BX1} , U_{BX2} . В первом такте участвует, например, VT2, к базовой цепи которого приложено открывающее напряжение – полуволна U_{BX2} .

В этот полупериод транзистор VT1 будет закрыт положительной полуволной U_{BX1} . Во втором такте транзистором VT1 усиливается вторая полуволна входного тока, а VT2 будет закрыт.

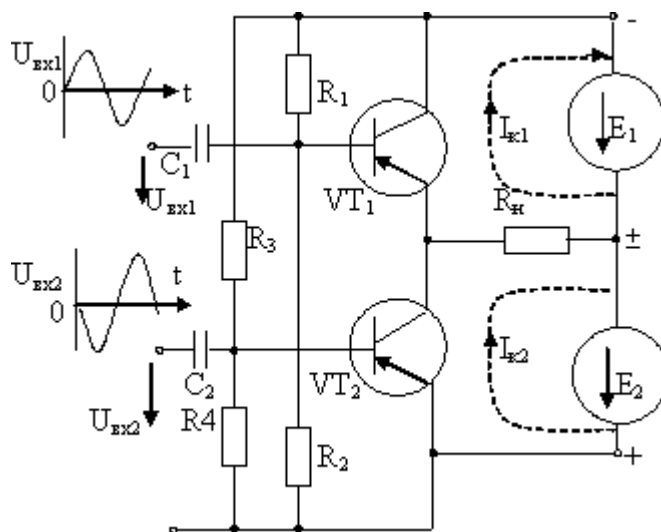


Рис. 8.3. Схема двухтактного безтрансформаторного усилителя с транзисторами одного типа проводимости

Вариант схемы двухтактного безтрансформаторного усилителя на транзисторах разного типа проводимости (на комплементарных транзисторах) показан на рис. 8.4.

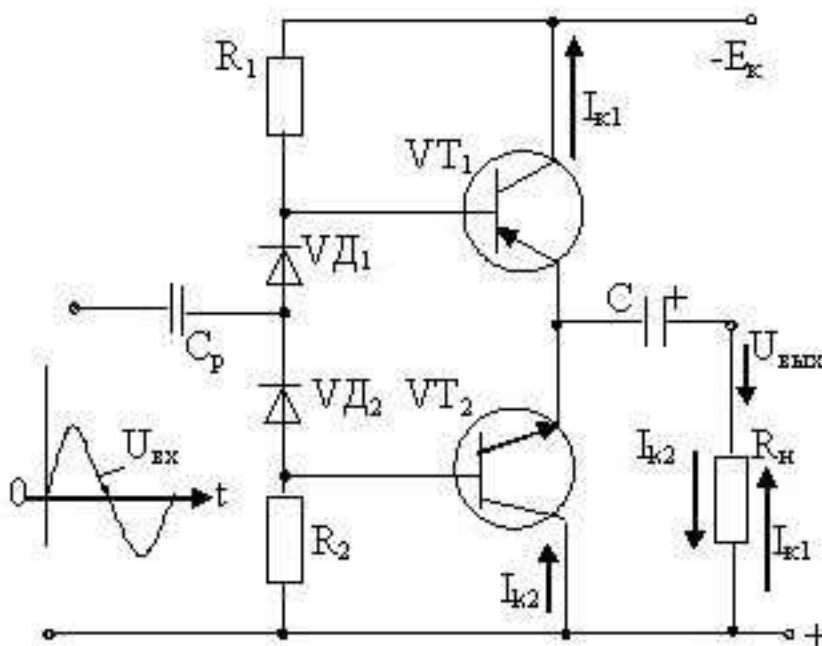


Рис. 8.4. Схема двухтактного усилителя с одним источником питания

В схеме нужен конденсатор C большой ёмкости, так как он заменяет источник питания в такте, когда транзистор VT_1 закрыт. Транзисторы должны иметь идентичные характеристики. Эти условия ограничивают область применения такого усилителя.

8.3. Усилители постоянного тока

Усилители постоянного тока (УПТ) – это усилители, способные усиливать не только сигналы переменного тока, но и сигналы, медленно изменяющиеся во времени, т.е. сигналы,

эквивалентная частота которых практически равна нулю. АЧХ УПТ отличается от АЧХ усилителя переменных сигналов (рис. 8.5).

Связь источника сигнала со входом усилителя и междкаскадные связи в УПТ не могут быть осуществлены посредством конденсаторов и трансформаторов подобно усилителям переменного тока.

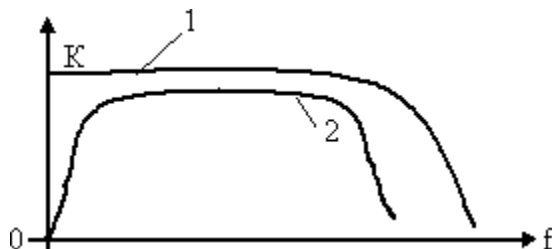


Рис. 8.5. Примерный вид АЧХ усилителя постоянного тока (1) и усилителя переменного тока (2)

В усилителях переменного тока связь входных и выходных цепей осуществляется резистивно-емкостными или трансформаторными цепями. Для передачи сигнала в УПТ по тракту усиления необходима непосредственная (с помощью проводников или резисторов) связь по постоянному току между усилительными каскадами и источником сигнала. В области высоких частот в УПТ сказываются паразитные емкостные и индуктивные связи, которые приводят к снижению коэффициента усиления в области высоких частот также, как и в усилителе переменного тока с резистивно-емкостными связями (рис. 8.5).

УПТ должны удовлетворять нескольким требованиям:

- при отсутствии входного сигнала должен отсутствовать выходной сигнал;
- при изменении знака входного сигнала должен изменяться знак и выходной сигнал;
- выходное напряжение должно быть пропорционально входному.

Усилители с непосредственной связью между каскадами. Непосредственная связь каскадов обуславливает особенности расчета их режима покоя (режима, при котором отсутствует входной сигнал).

В первую очередь необходимо из усиливаемого и выходного сигналов убрать постоянные составляющие, обеспечивающие исходный режим работы усилительного элемента. Это можно, например, осуществить компенсационным методом. Упрощенная схема каскада УПТ на одном транзисторе показана на рис. 8.6. Схема имеет, в основном, только теоретическое значение, на практике используются другие схемы, лишенные недостатков, присущих рассматриваемой.

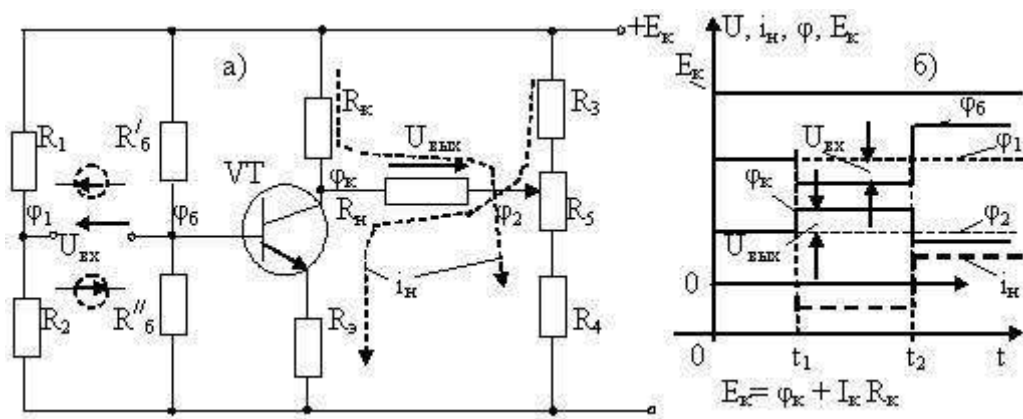


Рис. 8.6. Схема каскада УПТ с компенсацией постоянных составляющих (а) и диаграммы изменения сигналов (б):

φ_i – потенциалы в соответствующих точках;

i_H – ток в сопротивлении нагрузки R_H ;

U_{BX} – входной (усиливаемый) сигнал, $U_{BX} = \varphi_1 - \varphi_6$; U_{BYX} – выходное напряжение,

$U_{BYX} = \varphi_K - \varphi_2$; R_5 – резистор настройки нулевого уровня выходного напряжения при отсутствии входного сигнала

В схеме отсутствуют конденсаторы внутрикаскадных связей, поэтому вид АЧХ соответствует таковому для УПТ (рис. 8.5).

Резистор R_z осуществляет температурную стабилизацию и расширяет полосу пропускания каскада за счёт создания отрицательной обратной связи по току нагрузки.

Сопротивление нагрузки R_H включено между коллектором и средней точкой делителя R_3, R_5, R_4 . Входной сигнал (напряжение U_{BX}) подаётся между базой и средней точкой делителя R_1, R_2 .

При отсутствии входного напряжения ($U_{BX} = 0$) и равенстве потенциалов в соответствующих точках ($\varphi_1 = \varphi_6, \varphi_K = \varphi_2$) ток в нагрузке отсутствует ($i_H = 0$). Для точной подстройки режима служит переменный резистор R_5 . Если, например, на вход подать отрицательный сигнал (момент t_1 на рис. 8.6, б), ток базы транзистора уменьшится. Изменение тока базы вызывает соответствующее изменение тока коллектора, увеличивается потенциал φ_K , вызывая ток i_H в резисторе R_H . Если входной сигнал меняет знак (момент t_2) – ток коллектора увеличивается, потенциал φ_K уменьшается, в резисторе R_H ток изменит направление. Таким образом, схема удовлетворяет требованиям, предъявляемым к УПТ.

Рассмотренная выше схема усилителя постоянного тока имеет следующие недостатки:

а) нагрузочный резистор не соединен с общей точкой схемы;

б) источник входного сигнала не соединен с общей точкой схемы;

в) требуется тщательная предварительная настройка исходного состояния и подстройка в процессе работы. Это создает неудобства при построении более сложных схем.

Названные недостатки можно частично устранить, если использовать не один, а два источника питания.

Упрощенная схема каскада УПТ представлена на рис. 8.7.

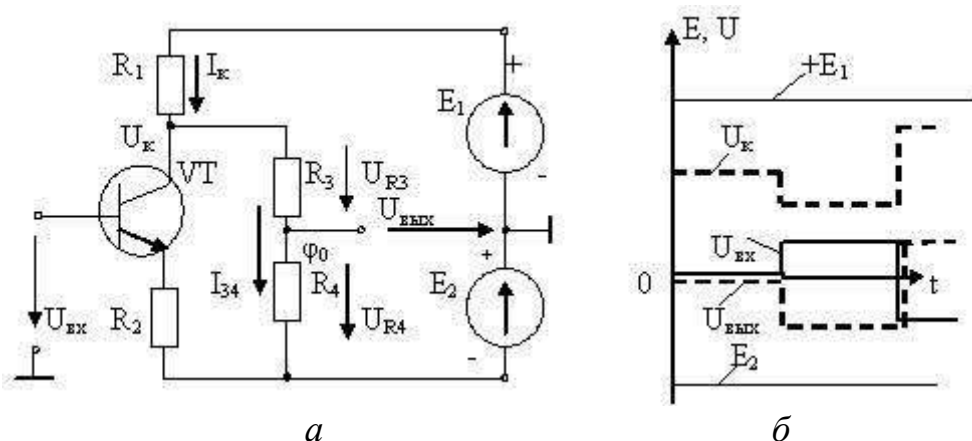


Рис. 8.7. Упрощенная схема (а) и диаграммы (б) сигналов каскада УПТ с двумя источниками питания

Работу каскада УПТ (рис. 8.7) можно пояснить следующим образом.

В контуре U_K , E_2 , R_4 , R_3 справедливо уравнение:

$$U_{R3} + U_{R4} = U_K + E_2.$$

Потенциал средней точки φ_0 делителя R_3R_4 должен быть равен нулю в исходном состоянии схемы, для чего должно соблюдаться условие $I_{34}R_4 = E_2$. В этом случае $E_2 = U_{R4}$, а $U_{R3} = U_K$. Ток I_{34} выбирают из соотношения $I_{34} = (0,02 - 0,1) I_K$, т.е. значительно меньше тока коллектора, чтобы не нарушать режим работы транзистора, в этом случае $R_3 = U_K / I_{34}$, $R_4 = E_2 / I_{34}$.

При подаче, например, положительного входного напряжения $U_{ВХ}$ возрастает ток базы, увеличивается ток коллектора I_K и падение напряжения $R_1 I_K$, снижается напряжение коллектора U_K . Это приводит к снижению потенциала средней точки φ_0 и появлению отрицательного выходного напряжения. Если $R_3 \gg R_1$, $R_4 \gg R_1$, (в этом случае можно пренебречь шунтирующим действием делителя R_3R_4) коэффициент усиления напряжения схемы можно приближённо определить по соотношению:

$$K = K_0 R_4 / (R_3 + R_4), \quad (8.1)$$

где K_0 – коэффициент усиления напряжения усилителя с коллекторной нагрузкой без делителя R_3R_4 .

Дрейф в УПТ (дрейф нуля). С течением времени в УПТ изменяются токи транзисторов и напряжения на их электродах, нарушается компенсация постоянных составляющих напряжений и на выходе УПТ появляется напряжение при отсутствии входного сигнала. Это явление называют дрейфом нуля.

УПТ должен усиливать напряжение вплоть до самых низких частот, поэтому всякое изменение постоянных составляющих напряжения из-за нестабильности источников питания, старения транзисторов, изменения температуры окружающей среды принципиально не отличается от полезного сигнала. Дрейф нуля можно наблюдать, если вход усилителя УПТ замкнуть накоротко, а на выходе включить милливольтметр. С течением времени на выходе появится напряжение дрейфа $U_{ВЫХ} = U_{ДР}$ (рис. 8.8).

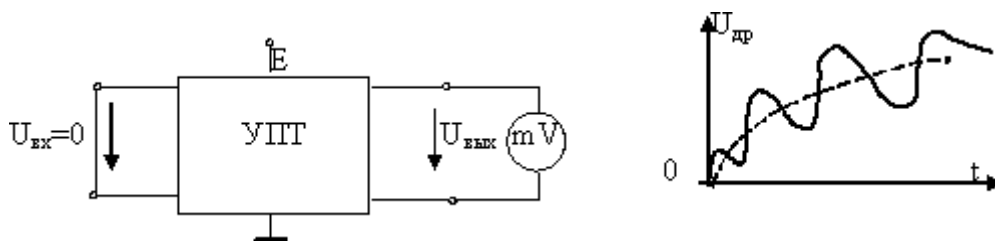


Рис. 8.8. Структурная схема для обнаружения дрейфа нуля и диаграмма изменения напряжения дрейфа после включения схемы

Если УПТ имеет коэффициент усиления по напряжению K , то величину дрейфа оценивают по выражению $U_{др} = U_{вых} / K$ при $U_{вх} = 0$ и называют дрейфом, приведенным к входу усилителя.

УПТ может правильно воспроизводить на выходе только те сигналы, которые значительно превышают напряжение дрейфа, т.е. при $U_{вх} \gg U_{др}$, поэтому $U_{др}$ определяет чувствительность усилителя по входу. Напряжение дрейфа условно можно разделить на две составляющие: монотонно изменяющаяся и переменная составляющие (медленный и быстрый дрейф).

Первая обусловлена изменением характеристик транзисторов, вторая – колебаниями напряжения источника питания, температуры и т.п.

Борьбу с дрейфом осуществляют различными способами, главные из них:

- стабилизация напряжения источников питания;
- стабилизация температурного режима;
- подбор и тренировка транзисторов;
- преобразование усиливаемого сигнала;
- использование дифференциальных (балансных) схем УПТ.

Например, при стабилизации напряжения питания с точностью $\pm 0,01\%$, температурной стабилизации $\pm 1^\circ\text{C}$ удастся снизить дрейф усилителя до $U_{др\text{ вых}} \approx (5 - 20)$ мВ.

8.4. Дифференциальный усилитель

Одним из эффективных способов борьбы с дрейфом нуля является использование дифференциальных схем усиления сигналов постоянного тока [8]. Дифференциальный усилитель (ДУ) – это устройство, усиливающее разность двух напряжений. В идеальном ДУ выходное напряжение должно быть пропорционально разности абсолютных величин этих напряжений. Входные и выходные напряжения определяются относительно общей точки схемы, являющейся также общей точкой двух последовательно включенных источников питания (рис. 8.9).

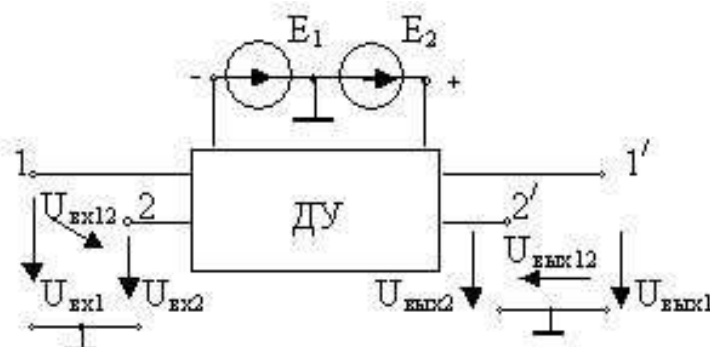


Рис. 8.9. Структурная схема дифференциального усилителя

Коэффициент усиления ДУ определяется как отношение разности выходных (усиленных) сигналов к разности входных сигналов:

$$K_P = (U_{ВЫХ1} - U_{ВЫХ2}) / (U_{ВХ1} - U_{ВХ2}) = U_{ВЫХ12} / U_{ВХ12}. \quad (8.2)$$

В реальном ДУ коэффициент усиления (передачи) напряжения K_P зависит не только от разности, но и от суммы напряжений. Это выражается в том, что выходное напряжение ДУ определяется по двум коэффициентам передачи входных сигналов:

$$U_{ВЫХ12} = U_{ВЫХ1} - U_{ВЫХ2},$$

$$U_{ВЫХ12} = K_P(U_{ВХ1} - U_{ВХ2}) \pm K_C (U_{ВХ1} + U_{ВХ2}) / 2, \quad (8.3)$$

где K_P – коэффициент усиления разностного напряжения;

K_C – коэффициент передачи суммы входных сигналов. Полусумму входных сигналов $(U_{ВХ1} + U_{ВХ2}) / 2$ называют синфазным сигналом. С учетом приведенных соотношений можно дать определение коэффициента передачи синфазного сигнала, полагая $(U_{ВХ1} - U_{ВХ2}) = 0$:

$$K_C = 2 (U_{ВЫХ1} - U_{ВЫХ2})_{СФ} / (U_{ВХ1} + U_{ВХ2}). \quad (8.4)$$

Коэффициент передачи синфазного сигнала есть отношение напряжения на выходе к синфазному входному напряжению при разностном напряжении на входе, равном нулю. Качество ДУ оценивается коэффициентом ослабления синфазного сигнала:

$$K_{ОЛСФ} = K_P / K_C. \quad (8.5)$$

С учетом (8.5) выходное напряжение будет определяться соотношением:

$$U_{ВЫХ12} = K_P[(U_{ВХ1} - U_{ВХ2}) \pm (U_{ВХ1} + U_{ВХ2}) / 2K_{ОЛСФ}]. \quad (8.6)$$

У «хороших» ДУ обычно $K_{ОЛСФ} = (80 - 120)$ дБ.

Относительную погрешность усиления разности напряжений можно найти по выражению:

$$\delta = 2(U_{ВХ1} + U_{ВХ2}) / [K_{ОЛСФ} (U_{ВХ1} - U_{ВХ2})]. \quad (8.7)$$

Выражение (8.7) показывает, что δ тем меньше, чем больше $K_{ОЛСФ}$.

Принципы построения дифференциальных усилительных каскадов. ДУ построены по принципу 4-плечевого измерительного моста (рис. 8.10).

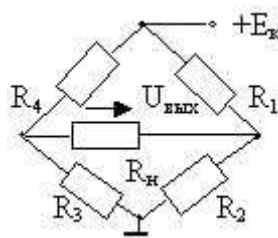


Рис. 8.10. Схема 4-плечевого измерительного моста

Мост сбалансирован (находится в равновесии), если $R_1 R_3 = R_2 R_4$, при этом $U_{\text{ВЫХ}} = 0$. Изменение напряжения питания E_K и пропорциональное изменение резисторов не нарушает равновесия в схеме.

Схема дифференциального усилителя показана на рис. 8.11, в ней вместо резисторов моста используются транзисторы.

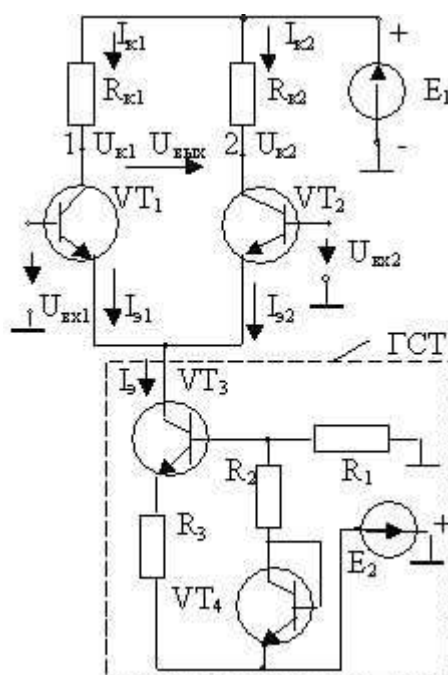


Рис. 8.11. Схема ДУ с транзисторами в плечах равновесного моста

Стабильность работы ДУ достигается не только использованием свойств равновесного моста, но и обеспечением стабильности тока $I_Э$, протекающего в цепях источников питания. Величина этого тока определяется параметрами схемы, называемой генератором стабильного тока (ГСТ). В неё входят транзисторы VT_3 , VT_4 , резисторы R_1 , R_2 , R_3 и источник E_2 . Равновесный мост образуют резисторы $R_{K1} = R_{K2}$, идентичные транзисторы VT_1 , VT_2 . Если $E_1 = E_2$, то $I_{Э1} = I_{Э2} = I_Э/2$. Если $U_{BX1} = U_{BX2}$, то $U_{K1} = U_{K2} = E_1 - I_Э R_K/2$, $U_{\text{ВЫХ}} = 0$. Это будет, в частности, и при $U_{BX1} = U_{BX2} = 0$, т.е. когда входы ДУ соединены с общей точкой схемы.

Наличие симметрии в схеме 4-плечевого моста с транзисторами – обязательное условие правильной работы схемы, поэтому характеристики используемых транзисторов должны быть идентичны.

Высокая стабильность ДУ (нечувствительность к дрейфу нуля) обеспечивается тем, что изменения параметров идентичных элементов происходят в одну сторону и при вычитании на выходе не проявляются.

Например, при изменении температуры напряжения U_{K1} и U_{K2} изменяются одинаково, и в выходном разностном сигнале $U_{ВЫХ}$ это изменение практически не ощущается.

Входных сигналов не обязательно должно быть два. В частности, один из сигналов может быть равен нулю. Входы называют дифференциальными, причем один из входов называют *инвертирующим*, а другой *неинвертирующим*. Для определения аналитических соотношений изобразим упрощенную схему ДУ (рис. 8.12).

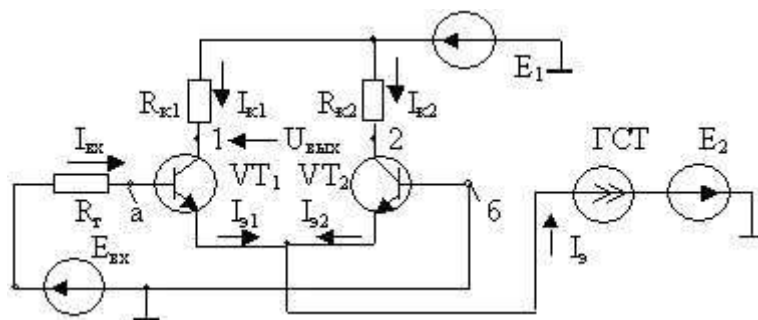


Рис. 8.12. Упрощенная схема ДУ

Можно заметить, что если подать входной сигнал $E_{ВХ}$ на базу VT_1 , то коллекторное напряжение в точке 1 (U_{K1}) с увеличением $E_{ВХ}$ уменьшается, т.е. инвертируется. При этом коллекторное напряжение в точке 2 (U_{K2}) с увеличением $E_{ВХ}$ тоже увеличивается, т.е. не инвертируется.

Поэтому вход a называют инвертирующим; b – не инвертирующим. При этом выходное напряжение:

$$U_{ВЫХ} = U_{K2} - U_{K1} = 2\Delta U_K, \quad (8.8)$$

где ΔU_K – величина изменения каждого коллекторного напряжения.

Интересно, что если, например, $I_{Э2} = 0$ (обрыв цепи эмиттера VT_2), то $I_{Э1} \approx I_{K1} \approx I_{Э}$, $U_{K1} = E_1 - I_{Э1} R_{K1}$, $U_{K2} = E_1$, $U_{ВЫХ} = I_{Э} R_{K1} = \text{Const}$.

Схема теряет способность усиления входного сигнала. С изменением полярности входного сигнала или при подаче входного сигнала на базовую цепь транзистора VT_2 процессы протекают аналогично.

Расчет коэффициента усиления по напряжению для дифференциального каскада.

Для упрощения будем считать, что входные сопротивления каскада по каждому входу транзисторов VT_1 ,

VT_2 (рис. 8.12) одинаковы, а $R_H = \infty$ (режим ХХ), тогда

$I_{ВХ} = E_{ВХ} / (R_r + R_{BX1} + R_{BX2}) \approx E_{ВХ} / (R_r + 2 h_{11Э})$, где R_r – внутреннее сопротивление источника входного сигнала $E_{ВХ}$. Входные токи создают приращения коллекторных токов $\pm \Delta I_K = \pm I_{ВХ} h_{21Э}$. Приращения токов вызывают приращения коллекторных напряжений:

$$\pm \Delta U_K = \pm \Delta I_K R_K = \pm h_{21Э} I_{ВХ} R_K.$$

Коэффициент усиления по напряжению здесь удобнее определить по соотношению: $K_{УХХ} = (U_{K1} - U_{K2}) / E_{ВХ}$ или $K_{УХХ} = 2\Delta U_K / E_{ВХ}$. После подстановки имеем

$$K_{УХХ} = 2 h_{21Э} \cdot R_K / (R_r + 2 h_{11Э}). \quad (8.9)$$

Если учесть сопротивление нагрузки, то:

$$K_{UH} = 2h_{21Э} \cdot (R_K \parallel R_H) / (R_{\Gamma} + 2h_{11Э}).$$

Если $R_{\Gamma} \rightarrow 0$, а $R_H \rightarrow \infty$, то

$$K_{УД} = h_{21Э} \cdot R_K / h_{11Э}, \quad (8.10)$$

где $K_{УД}$ – коэффициент усиления каскада при указанных условиях.

В случае, когда подаются оба сигнала и подаваемые входные напряжения разнополярны, то

$$U_{ВЫХ} = K_{УД} \cdot [U_{ВХ1} - (-U_{ВХ2})] = K_{УД} (U_{ВХ1} + U_{ВХ2}). \quad (8.11)$$

Если подаваемые входные напряжения однополярны (синфазны), то

$$U_{ВЫХ} = K_{УД} (U_{ВХ1} - U_{ВХ2}). \quad (8.12)$$

8.5. Некоторые схемные решения, используемые в усилителях

С целью улучшения свойств ДУ используют решения, которые часто встречаются в схемах усилительных каскадов интегральных элементов. Одно из таких решений – генератор стабильного тока, схема которого показана на рис. 8.13.

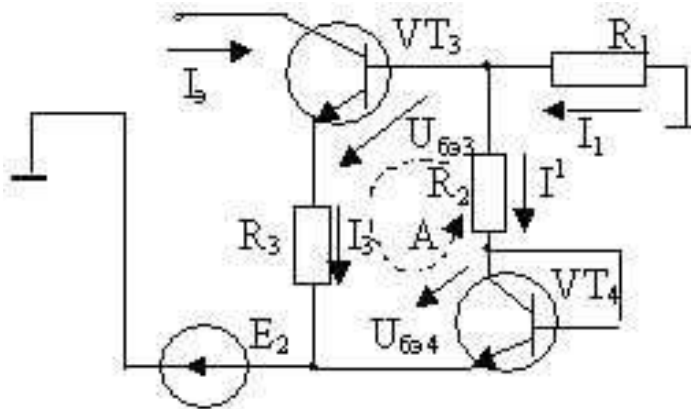


Рис. 8.13. Расчетная схема ГСТ

Для определения свойств ГСТ используем уравнение баланса напряжений в контуре А:
 $U_{БЭ3} + I_3 R_3 = I_1 R_2 + U_{БЭ4}$. Током, ответвляющимся в базу VT_3 , пренебрегаем. В этом случае $I_1 = I_1'$, а входной ток $I_Э$ равен току I_3 . Определим величину тока $I_Э$:

$$I_Э = [I_1 R_2 + (U_{БЭ4} - U_{БЭ3})] / R_3. \quad (8.13)$$

$$\text{Если } U_{БЭ3} = U_{БЭ4}, \text{ то } I_Э = I_1 R_2 / R_3 = [E_2 / (R_1 + R_2)] R_2 / R_3. \quad (8.14)$$

Если E_2 стабильно и R_1, R_2, R_3 – точные, то $I_Э = \text{Const}$ независимо от сопротивления той части схемы ДУ, откуда он вытекает (но обязательно при её наличии).

Схемное решение ГСТ, называемое «токовое зеркало» представлено на рис. 8.14.

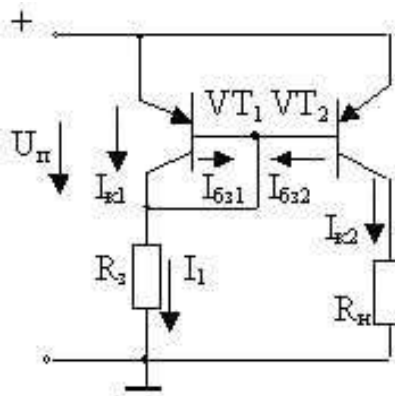


Рис. 8.14. Схема «токовое зеркало»

Для схемы справедливы уравнения:

$$I_1 = I_{K1} + I_{B31} + I_{B32} = (1 + h_{21,1})I_{B31} + I_{B32}; I_{K2} = h_{21,2} I_{B32},$$

$$I_{K1}/I_{K2} = [(1 + h_{21,1})I_{B31} + I_{B32}] / h_{21,2} I_{B32}. \quad (8.15)$$

Если $I_{B31} = I_{B32}$, что может быть лишь при идентичных транзисторах, $h_{21,1} = h_{21,2} > 1$, то $I_{K2} = I_1(h_{21,1} + 2)/h_{21,2} = I_1(1 + 2/h_{21,2})$, т.е. ток I_{K2} приближённо равен I_1 .

Ток в цепи резистора R_3 определяется напряжением $U_{П}$:

$I_1 = (U_{П} - U_{БЭ}) / R_3$, а ток I_{K2} практически не зависит от сопротивления резистора R_H (это свойство генератора тока). Равенство $I_1 = I_{K2}$ определило название схемы – «токовое зеркало». На транзисторах с проводимостью типа $n-p-n$ схема «токовое зеркало» будет иметь вид, показанный на рис. 8.15.

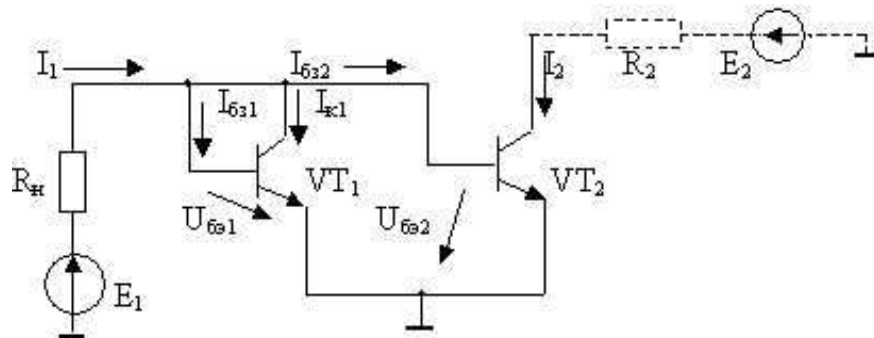


Рис. 8.15. «Токовое зеркало» на транзисторах $n-p-n$

Для схемы справедливы уравнения: $I_{K1} = h_{21} I_{B31}$; $I_1 = I_{K1} + 2I_{B31}$, так как $I_{B31} = I_{B32}$, потому что $U_{БЭ1} = U_{БЭ2}$; $I_2 = h_{21} I_{B32} = h_{21} I_{B31}$; $I_1 = (E_1 - U_{БЭ1})/R_H$.

Определяем отношение токов, подставляя их значения:

$$I_2 / I_1 = h_{21} \cdot I_{B31} / (I_{K1} + 2I_{B31}) = h_{21} / (2 + h_{21}) \approx 1. \quad (8.16)$$

При достаточно больших значениях R_H , h_{21} и E_1 получим $I_2 = I_1 \equiv E_1 / R_H$, что соответствует свойству «токового зеркала». Улучшенный вариант схемы (рис. 8.14) представлен на рис. 8.16.

Если изменится полярность входного тока, изменится знак $U_{ВЫХ}$. Коэффициент усиления напряжения определится соотношением:

$$K_U = U_{ВЫХ} / e_{\Gamma} = 2 h_{21} R_H / (R_{\Gamma} + 2 h_{11}). \quad (8.18)$$

Выражение (8.18) показывает, что коэффициент усиления схемы K_U пропорционален сопротивлению резистора нагрузки R_H .

Составные транзисторы. В усилительных схемах, в том числе и дифференциальных, часто используются так называемые составные транзисторы, представляющие собой два или более транзистора, которые собраны в схему, имеющую три вывода и работающую как отдельный транзистор. Простейшие схемы составных транзисторов представлены на рис. 8.18.



Рис. 8.18. Схемы составных транзисторов

Схема рис. 8.18, а имеет следующие значения h -параметров: $h_{11} = h_{11\beta 1} + h_{11\beta 2}(1 + h_{21\beta 1})$; $h_{21} = h_{21\beta 1} + h_{21\beta 2}(1 + h_{21\beta 1})$; $h_{12} = h_{12\beta 1}$; $h_{22} = h_{22\beta 2}$. Схема имеет большое входное сопротивление и большой коэффициент усиления базового тока.

В схеме рис. 8.18, б, называемой каскодной, $h_{11} = h_{11\beta 1}$; $h_{12} = h_{12\beta 1}h_{12\beta 2}$; $h_{22} = h_{22\beta 2}$; $h_{21} = h_{21\beta 1}h_{21\beta 2} \approx h_{21\beta 1}$. Эта схема имеет $h_{12} \approx 0$, поэтому обладает улучшенными частотными свойствами и расширенной полосой пропускания.

9. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

9.1. Общие сведения

Операционный усилитель (ОУ) – это усилитель постоянного тока, имеющий большой коэффициент усиления в широком диапазоне частот (от 0 до десятков МГц), выполненный по интегральной технологии. ОУ позволяет реализовать усилительные устройства, приближающиеся по свойствам к идеальным усилителям, и поэтому относится к универсальным электронным схемам, на основе которых строят разнообразные функциональные узлы.

Из теории усилителей известно, что при достаточно большом собственном коэффициенте усиления усилительного элемента свойства усилительного каскада, охваченного цепями внешних обратных связей, определяются свойствами этих связей [21]. На основе ОУ выбором элементов цепей обратных связей можно обеспечить выполнение различных математических операций с аналоговыми сигналами: сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование, логарифмирование, усреднение и др.

Особенности схемотехники ОУ определяются тем, что в его схеме используются лучшие схемные решения усилительных устройств: на входе ОУ – дифференциальный усилительный каскад, используются динамические нагрузки, схемы источников тока, токовое зеркало, эмиттерные повторители на выходе (рис. 9.1).

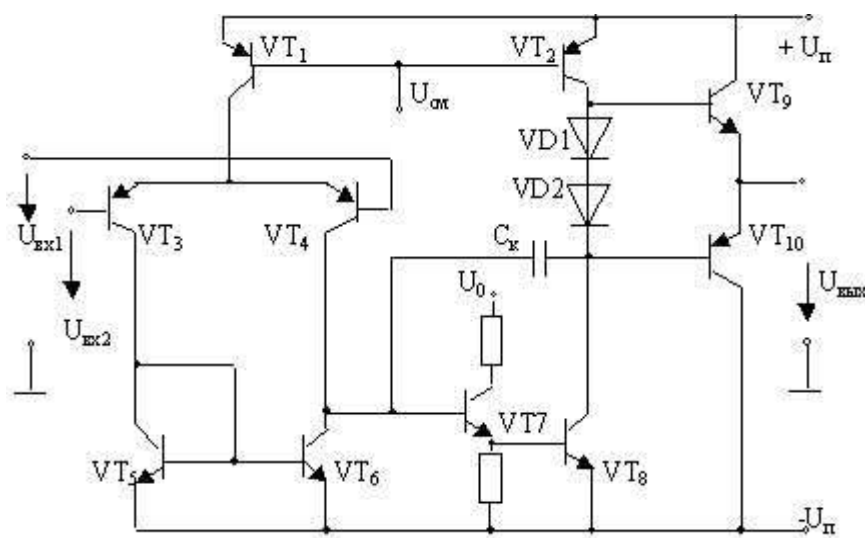


Рис. 9.1. Упрощенная структурная схема ОУ (пример)

В схемах ОУ изображают либо прямоугольником, либо треугольником с указанием входов и выхода, как показано на рис. 9.2.

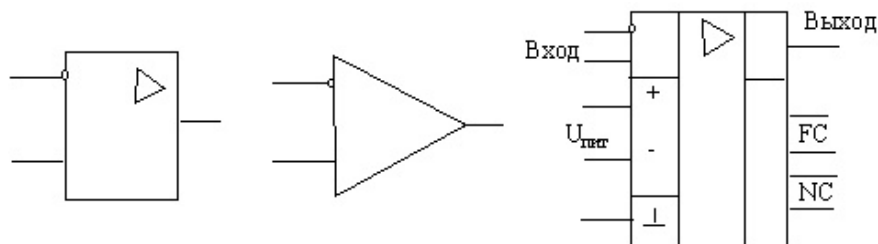


Рис. 9.2. Варианты условных графических изображений ОУ:
FC – выходы для частотной коррекции; NC – выходы для коррекции нуля

Характерной особенностью ОУ является то, что входные сигналы подаются относительно одной общей для входа и выхода точки (шины), которая непосредственно связана с общей точкой двух последовательно соединенных источников питания. Эта точка может не выводиться из корпуса микросхемы, а образована внешними цепями. ОУ имеет два входа, один из которых называется *инвертирующим*, а другой *неинвертирующим* (инвертирующий вход помечают кружком). Часто эти входы называют соответственно *инверсным* и *прямым*. Выводы для коррекции у современных ОУ могут отсутствовать.

9.2. Идеальный операционный усилитель

Основные принципы работы устройств, построенных на основе ОУ, базируются на понятии «идеальный ОУ», т.е. виртуальный ОУ, для которого приняты следующие допущения: собственный коэффициент усиления $K = \infty$, входное сопротивление $R_{BX} = \infty$, выходное сопротивление $R_{вых} = 0$, полоса пропускания $\Delta f = (0 - \infty)$ Гц, отсутствуют дрейф и шумы (при $U_{BX} = 0$, $U_{ВЫХ} = 0$) [6].

С учетом принятых допущений найдем основное уравнение для идеального ОУ. Для этого составим систему уравнений для схемы, показанной на рис. 9.3.

Примем разность потенциалов между входами равной нулю, тогда:

$$\begin{aligned} U_{BX1} - U_{BX2} - I_1 Z_1 &= 0; \\ U_{BX1} - U_{ВЫХ} - I_2 Z_2 - I_1 Z_1 &= 0; \\ I_1 &= (U_{BX1} - U_{ВЫХ})/Z_1. \end{aligned}$$

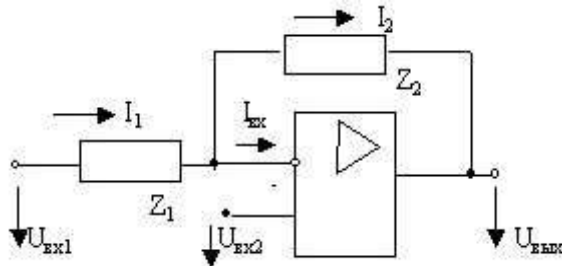


Рис. 9.3. Расчетная схема для идеального ОУ

Учитывая, что $I_1 = I_2$, получим:

$$U_{ВЫХ} = -U_{ВХ1} Z_2 / Z_1 + U_{ВХ2} (1 + Z_2 / Z_1). \quad (9.1)$$

Уравнение (9.1) позволяет получить соотношения между входными и выходным сигналами для частных случаев:

- а) $U_{ВХ1} = 0$, $U_{ВЫХ} = U_{ВХ2} (1 + Z_2 / Z_1)$ – неинвертирующее включение ОУ (рис. 9.4, а);
- б) $U_{ВХ2} = 0$, $U_{ВЫХ} = -U_{ВХ1} Z_2 / Z_1$ – инвертирующее включение ОУ (рис. 9.4, б);
- в) $Z_2 = 0$, $U_{ВЫХ} = U_{ВХ2}$ – ОУ включен по схеме повторителя напряжения (рис. 9.4, в).

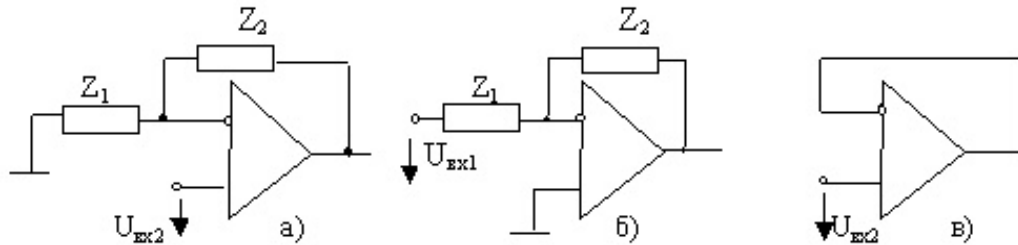


Рис. 9.4. Варианты включения ОУ:

а – неинвертирующее включение; б – инвертирующее включение;
в – повторитель напряжения

Выбирая различные виды входных элементов и обратных связей ОУ, можно строить различные функциональные узлы. Широко распространены сумматоры (вычитатели) аналоговых сигналов, интеграторы, дифференциаторы и др. Структурные схемы таких устройств показаны на рис. 9.5.

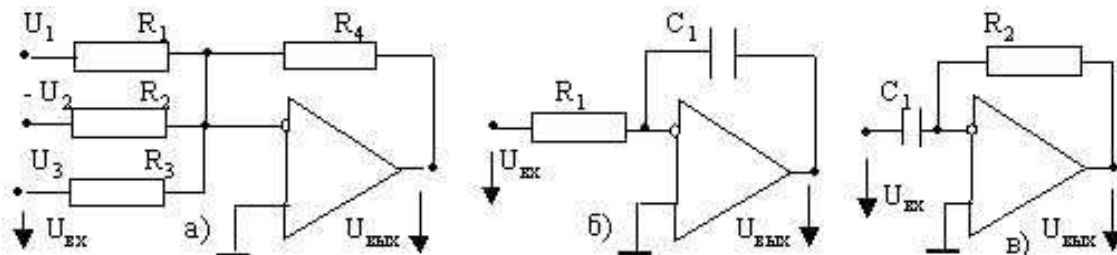


Рис. 9.5. Функциональные узлы, построенные на ОУ:

а – сумматор (вычитатель) напряжений; б – интегратор входного напряжения;
в – дифференциатор входного напряжения

Уравнения, связывающие входные и выходные напряжения для схем (рис. 9.5) имеют следующий вид:

Схема (а): $U_{ВЫХ} = -R_4 [(U_1 / R_1) - (U_2 / R_2) + (U_3 / R_3)]$.

Схема (б): $U_{ВЫХ} = -1/T_{И} \int U_{ВХ} dt$,

где $T_{И}$ – постоянная времени интегрирования, $T_{И} = R_1 C_1$.

Схема (в): $U_{ВЫХ} = -T_{Д} dU_{ВХ}/dt$,

где $T_{Д}$ – постоянная времени дифференцирования, $T_{Д} = R_2 C_1$.

Уравнения, характеризующие свойства схем с ОУ, охваченными различного рода цепями обратных связей, имеют несложный вид только в том случае, если принимается предположение, что ОУ идеален.

В практических уточняющих расчетах схем с применением ОУ часто используют схемную модель ОУ (схему замещения), в которой можно учесть реальные входные и выходные сопротивления ОУ, влияние величины и несимметрии входных токов, напряжение смещения нуля. Один из простых вариантов схемы замещения ОУ [6] показан на рис. 9.6.

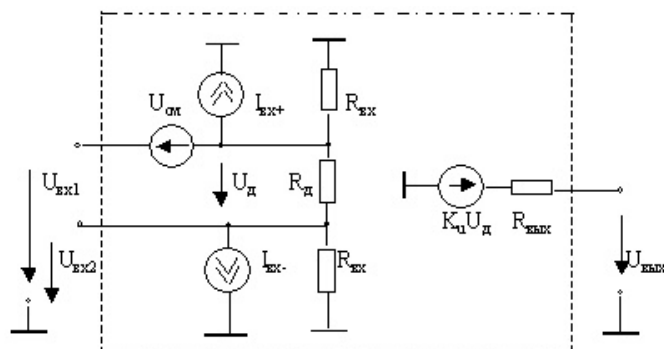


Рис. 9.6. Схема замещения ОУ для малых сигналов (вариант)

В схеме замещения обозначено: U_d – дифференциальное напряжение, которое усиливается в схеме, причем $U_d = U_{BX1} - U_{BX2} + U_{CM}$; R_d – дифференциальное входное сопротивление; K_U – собственный коэффициент усиления; U_{CM} – напряжение смещения входа. Наличие входных токов по каждому входу имитируется двумя источниками тока I_{BX-} , I_{BX+} .

9.3. Основные параметры и характеристики операционных усилителей

Реальный ОУ описывается большим числом параметров и характеристик, некоторые из которых являются входными, некоторые – выходными, другие характеризуют передачу сигнала операционным усилителем. Основные параметры и характеристики реального ОУ:

1. Напряжение смещения нуля U_{CM} – это напряжение на выходе ОУ при нулевом входном сигнале, деленное на коэффициент усиления:

$$U_{CM} = U_{ВЫХ} / K, \quad U_{BX} = 0.$$

2. Входные токи обусловлены конечным значением входных сопротивлений ОУ. Входные токи ОУ обеспечивают нормальную работу входного дифференциального каскада. Если этот каскад выполнен на полевых транзисторах, то входные токи столь малы, что сравнимы с токами различных утечек. Однако если источники входного сигнала, подключенные к входам ОУ, имеют разные внутренние сопротивления, то между входами образуется нежелательная разность потенциалов, которая после усиления появится на выходе. Поэтому резисторы, подключаемые к входам ОУ, следует по возможности выбирать с одинаковыми сопротивлениями.

3. Разность входных токов образуется по приведенным в п. 2 причинам и может иметь любой знак.

4. Входные сопротивления: дифференциальное и синфазное.

Дифференциальное входное сопротивление – это полное входное сопротивление со стороны любого входа при условии, что второй вход соединен с общим выводом схемы. Значение этого сопротивления – от десятков кОм до сотен мОм. Входное синфазное сопротивление характеризует изменение среднего входного тока при приложении к входам ОУ синфазного напряжения. Синфазное сопротивление на несколько порядков выше сопротивления для дифференциального сигнала.

5. Коэффициент ослабления синфазного сигнала – это отношение напряжения синфазного (поданного на оба входа одновременно) сигнала к дифференциальному входному на-

пряжению, которое обеспечило бы на выходе такой же сигнал, как и в случае подачи синфазного напряжения:

$$K_{ОЛСФ} = U_{ВХ СФ} / U_{ВХ ДИФ}, \text{ при } U_{ВЫХ СФ} = U_{ВЫХ ДИФ}.$$

Так как $U_{ВЫХ} = K (U_{ВХ ДИФ} + U_{ВХ СФ} / K_{ОЛСФ})$, то ясно, что $K_{ОЛСФ}$ характеризует диапазон синфазного напряжения, при котором работа ОУ не нарушается.

6. Температурные дрейфы: по напряжению – $U_{СМ} / ^\circ\text{C}$, по току – $I_{ВХ} / ^\circ\text{C}$ важны для особо точных (прецизионных) ОУ, оцениваются в мкВ/ $^\circ\text{C}$ и в нА/ $^\circ\text{C}$.

7. Напряжение шумов, приведенное к входу, – это действующее значение $U_{ВЫХ}$ при нулевом входном сигнале и нулевом внутреннем сопротивлении источника сигнала, деленное на коэффициент усиления ОУ: $U_{Ш ВХ} = U_{Ш ВЫХ} / K$.

Шумы оценивают в определенной полосе частот входного сигнала, поэтому размерность оценки шума имеет вид: нВ / $\sqrt{\text{Гц}}$. Иногда

в технических данных ОУ приводят значение коэффициента шума

в дБ, как отношение мощностей приведенного шума ОУ к мощности шума внутреннего сопротивления источника, с помощью которого измеряют шумовые характеристики.

8. Коэффициент влияния нестабильности источника питания – это отношение приведенного к входу изменения выходного напряжения ОУ к вызвавшему его изменению питающего напряжения:

$$K_\epsilon = \Delta U_{СМ} / \Delta U_{ПИТ}, \text{ мкВ/В.}$$

9. Выходное сопротивление – это измеренное со стороны выходного зажима ОУ активное сопротивление.

10. Выходное напряжение и выходной максимально допустимый ток – параметры, указывающиеся при определенной (допустимой) величине сопротивления нагрузки.

11. Коэффициент усиления по напряжению K_U .

12. Частота единичного усиления f_1 – это частота входного сигнала, при которой модуль коэффициента усиления ОУ равен 1. Часто указывают граничную частоту, под ней подразумевается частота, до которой ОУ обеспечивает гарантируемое значение коэффициента усиления.

13. Допустимая скорость нарастания напряжения – это максимальная скорость изменения выходного напряжения при максимальном значении его амплитуды, В/мкс.

14. Время установления выходного сигнала – время, за которое выходной сигнал нарастает от 0,1 до 0,9 амплитудного значения.

15. Время восстановления – время возврата из режима насыщения.

16. Амплитудная характеристика представляет собой зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды входного сигнала. Согласно такому определению ОУ будет иметь две характеристики: для инвертирующего и неинвертирующего входов. Вид характеристик представлен на рис. 9.7.

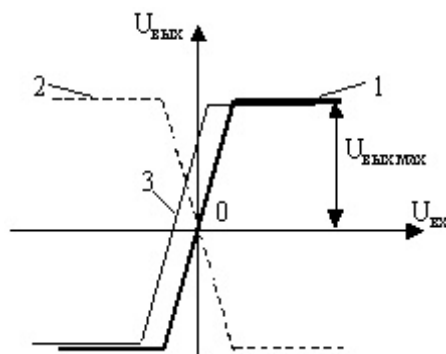


Рис. 9.7. Амплитудные характеристики ОУ:

1 – по неинвертирующему входу, 2 – по инвертирующему входу,
3 – по неинвертирующему входу при наличии смещения нуля

Следует учитывать, что масштабы напряжений имеют разные значения: по горизонтальной оси – милливольты, по вертикальной оси – вольты, а также то, что в ОУ максимальное $U_{ВЫХ}$ не может превышать напряжение источника питания.

17. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная характеристика (ФЧХ). АЧХ показывает зависимость коэффициента усиления ОУ от частоты входного сигнала. ФЧХ показывает зависимость угла сдвига фаз входного и выходного сигналов от частоты входного сигнала. Наличие указанных характеристик обусловлено тем, что в схеме ОУ всегда имеются паразитные емкости и индуктивности, вносящие сдвиги фаз в сигналы в процессе их усиления. При этом с ростом частоты коэффициент усиления падает, а фазовый сдвиг увеличивается. Если фазовый сдвиг достигает значения 2π , то отрицательная обратная связь превращается в положительную, усилитель превращается в генератор беспорядочных колебаний (возбуждается), теряет устойчивость работы, а следовательно и усилительные свойства.

Примерный вид АЧХ и ФЧХ показан на рис. 9.8.

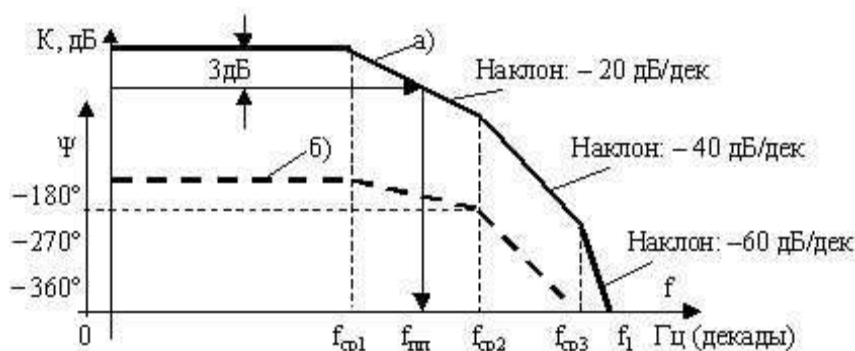


Рис. 9.8. Частотные характеристики ОУ:

а – АЧХ, б – ФЧХ

На рис. 9.8, а по вертикальной оси откладывается значение модуля коэффициента усиления ОУ (обычно в дБ), по горизонтальной оси отложены значения частот в логарифмическом масштабе.

Характерные точки АЧХ показывают диапазоны частот, в которых происходит изменение модуля коэффициента усиления: $f_{ср1}$, $f_{ср2}$, $f_{ср3}$ – частоты «среза» – частоты, при которых происходит заметное уменьшение коэффициента усиления; $f_{пл}$ – частота «полосы пропускания» – показывает диапазон частот, в котором модуль коэффициента усиления уменьшается от максимального значения не более, чем на 3 дБ; f_1 – частота «единичного усиления», при

которой входной сигнал уже не усиливается. На логарифмических АЧХ (ЛАЧХ) участки характеристики показывают отрезками прямых линий, имеющих наклон, соответствующий скорости изменения модуля коэффициента усиления ОУ при изменении частоты входного сигнала (рис. 9.8, *а*). Фазочастотная характеристика на рис. 9.8, *б* представлена для случая, когда входной сигнал подан на инвертирующий вход, поэтому начальное значение угла сдвига фаз $\Psi = -180^\circ$. По мере роста частоты модуль угла сдвига фаз увеличивается, при некоторой частоте достигается значение -360° , что приводит к потере устойчивости работы ОУ.

С целью недопущения таких режимов производят частотную коррекцию характеристик при изготовлении ОУ (внутренняя коррекция), либо делают специальные контактные выводы в микросхеме ОУ для подключения корректирующих конденсаторов (внешняя коррекция).

Коррекцией добиваются желательного изменения АЧХ и ФЧХ в заданном диапазоне частот усиливаемого сигнала. Особого внимания заслуживает случай, когда нагрузка ОУ носит емкостный характер, так как емкость вносит дополнительный сдвиг фаз в усилительный тракт, который может привести к самовозбуждению схемы. С целью предотвращения самовозбуждения в цепь отрицательной обратной связи ОУ обычно включают дополнительные конденсаторы для коррекции ФЧХ и АЧХ.

9.4. Обратные связи в усилительных устройствах

Обратной связью (ОС) называют процесс передачи выходного сигнала (целиком или его части) с выхода на вход усилительного устройства с целью коррекции характеристик и параметров этого устройства.

Обратная связь осуществляется с помощью электрических цепей (устройств), соединяющих вход и выход усилительного устройства. Часто эти цепи тоже называют обратной связью и говорят, что они «охватывают» усилитель или усилительное устройство. В общем случае ОС может охватывать один усилительный каскад или несколько каскадов, поэтому можно различать *общую* и *местную* ОС.

Сигнал ОС, получаемый с выхода устройства, может на входе либо суммироваться с основным усиливаемым сигналом, либо вычитаться из него. В первом случае обратную связь называют *положительной* (ПОС), во втором – *отрицательной* (ООС). В случае сигналов переменного тока ПОС будет осуществляться при совпадении фаз основного (входного) сигнала и сигнала ОС, а ООС – при разности этих фаз, равной 180° .

Основные соотношения для усилительного устройства, охваченного цепями обратной связи, можно получить из обобщённой структурной схемы усилительного устройства, состоящего из усилительного каскада, цепи обратной связи и сумматора сигналов на входе (рис. 9.9).

Система уравнений, характеризующих структурную схему, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{ВЫХ} &= K U_C; \\ U_C &= U_{ВХ} + \beta U_{ВЫХ}, \end{aligned} \quad (9.2)$$

где K – собственный коэффициент передачи усилителя;

β – коэффициент передачи цепи (звена) ОС;

$U_{ВХ}$ – входной (основной) усиливаемый сигнал;

$U_{ВЫХ}$ – выходной сигнал усилительного устройства.

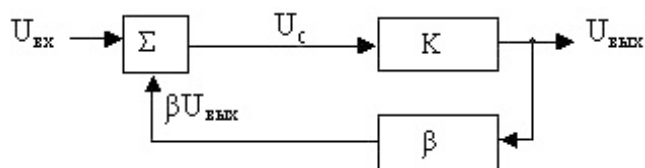


Рис. 9.9. Обобщённая структурная схема усилительного устройства с цепью обратной связи

Вычислим по общему правилу результирующий коэффициент передачи (усиления) схемы: $K_P = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}$. С учётом уравнений (9.2) получим:

$$K_P = K / (1 - \beta K). \quad (9.3)$$

Полученное выражение позволяет сделать важные выводы о свойствах усилительного устройства, охваченного цепью ОС, а также выяснить степень влияния свойств звена ОС на общие свойства этого устройства.

В усилительных устройствах используют разнообразные виды обратных связей, различающихся по способам получения (формирования) сигнала ОС, по способам использования (введения) сигнала ОС на входе, по частотным свойствам и т.д. Основные названия видов ОС представлены на рис. 9.10.

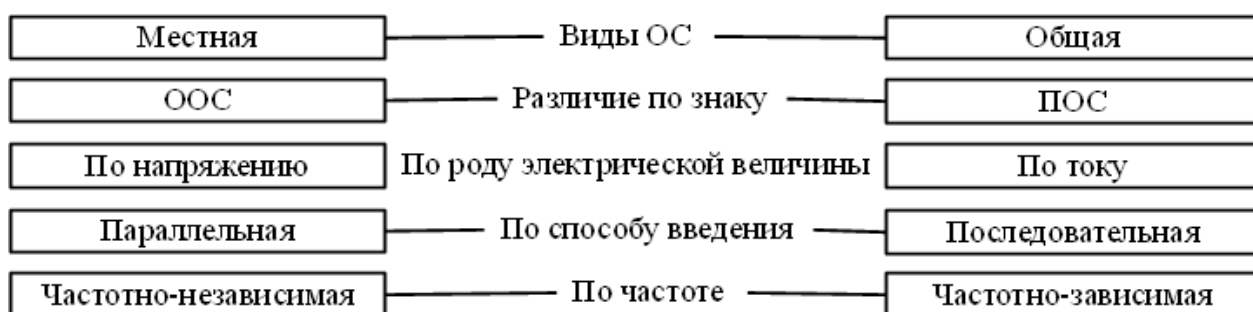


Рис. 9.10. Классификация типов обратной связи

Рассмотрим влияние обратных связей на общие свойства усилительного устройства, обобщенная схема которого изображена на рис. 9.9.

Анализ выражения (9.3) показывает, что величина результирующего коэффициента передачи схемы зависит от величины и знака коэффициента передачи звена ОС β , причём, если $\beta > 0$, а $\beta K < 1$, то $K_P > K$, т.е. коэффициент усиления схемы становится больше, чем собственный коэффициент усиления усилительного элемента (УЭ). Если $\beta < 0$, то $K_P < K$, т.е. коэффициент усиления схемы становится меньше, чем собственный коэффициент усиления УЭ.

Первый случай соответствует ПОС, второй – ООС. Если $\beta K = 1$, то теоретически результирующий коэффициент передачи увеличивается до бесконечно большой величины. На практике схема становится неработоспособной как усилитель и превращается в устройство, генерирующее (если не принять специальных мер) беспорядочные колебания выходного сигнала (говорят, что схема теряет устойчивость – «возбуждается»). Если предположить, что

собственный коэффициент усиительного звена достаточно большой, то из выражения (9.3) можно получить

$$K_p \approx -(1/\beta). \quad (9.4)$$

Полученное соотношение свидетельствует о том, что свойства усилителя с большим собственным коэффициентом усиления будут определяться свойствами звена обратной связи. Этот факт широко используется для построения разнообразных функциональных узлов и устройств на основе ОУ.

Влияние ОС на другие параметры усилительного устройства рассмотрим на примерах изменения входных и выходных сопротивлений устройств с введением цепей ОС. Отметим два важных свойства указанных параметров:

1. Входное сопротивление устройства, охваченного цепью ОС, зависит от способа введения сигнала ОС во входную цепь и не зависит от способа получения этого сигнала.
2. Выходное сопротивление усилителя, охваченного цепью ОС, зависит от способа получения сигнала ОС и не зависит от способа введения этого сигнала во входную цепь.

Методику определения входных и выходных сопротивлений для усилительного каскада, охваченного цепью ОС, рассмотрим на примере обобщённой структурной схемы усилителя напряжения, показанной на рис. 9.11.

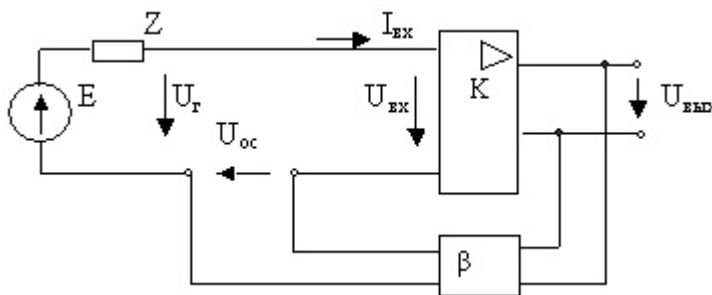


Рис. 9.11. Структурная схема усилительного устройства с ОС, введённой последовательно по напряжению

В схеме соблюдаются следующие очевидные соотношения:

$$U_{ВЫХ} = KU_{ВХ}; U_{ОС} = \beta U_{ВЫХ}; U_{Г} = U_{ВХ} + U_{ОС}; U_{ВХ}/I_{ВХ} = Z_{ВХ0},$$

где $Z_{ВХ0}$ – собственное входное сопротивление усилителя, имеющего собственный коэффициент усиления K .

Определяя по общему правилу входное сопротивление всей схемы как $Z_{ВХ} = U_{Г} / I_{ВХ}$, получим:

$$Z_{ВХ} = Z_{ВХ0}(1 + \beta K). \quad (9.5)$$

Соотношение (9.5) показывает, что при наличии ООС входное сопротивление схемы увеличивается. Если направление напряжения $U_{ОС}$ изменить на противоположное, получим положительную обратную связь. В этом случае

$$Z_{ПВХ} = Z_{ВХ0}(1 - \beta K). \quad (9.6)$$

Анализ показывает, что в этом случае входное сопротивление схемы может быть нулевым, отрицательным либо положительным, но меньше $Z_{ВХ0}$.

Используя для анализа выходных сопротивлений соотношения, аналогичные (9.5, 9.6), можно получить следующие результаты:

1. ООС по напряжению уменьшает выходное сопротивление схемы, а ПОС либо увеличивает его, либо делает отрицательным.

2. ООС по выходному току увеличивает выходное сопротивление схемы, ПОС может это сопротивление оставить неизменным, увеличить его или сделать отрицательным.

Подробный анализ действия цепей ОС в усилительных устройствах позволяет сделать следующие общие выводы [11]:

1. Введение цепей ОС изменяет основные параметры усилительного устройства как количественно, так и качественно.

2. Действие ООС и ПОС, как правило, противоположно.

3. Введение цепей ООС стабилизирует коэффициент усиления устройства, расширяет полосу пропускания, уменьшает частотные и фазовые искажения.

4. Введение цепей ПОС сужает полосу пропускания устройства, приводит к увеличению частотных и фазовых искажений, уменьшает устойчивость схемы к изменениям параметров и характеристик элементов схемы.

5. Параметры цепей (звеньев) ОС оказывают существенное влияние на параметры и характеристики всего усилительного устройства.

9.5. Примеры использования операционных усилителей и обратных связей в некоторых схемах

Конверторы сопротивлений. ОУ позволяют строить схемы, обладающие свойствами, нехарактерными для обычных элементов. Примерами могут служить так называемые конверторы и инверторы сопротивлений и проводимостей [6]. Эти схемы позволяют изменять масштаб сопротивлений, проводимостей, ёмкостей и индуктивностей, заменять индуктивные элементы ёмкостными, изменять знак сопротивлений с положительного на отрицательный, схемно получать отрицательные ёмкости и индуктивности. Понятия отрицательной ёмкости и индуктивности связаны с комплексным представлением соответствующих проводимостей. Положительная ёмкость имеет комплексную проводимость $Y_C = \omega C e^{j90^\circ}$, которая показывает, что ток в ёмкости опережает напряжение на 90° . В отрицательной ёмкости ток будет отставать от напряжения на 90° .

Известно, что в индуктивности (положительной) ток отстаёт от напряжения на 90° , а индуктивное сопротивление представляют комплексной величиной $Z_L = \omega L e^{j90^\circ}$.

Отрицательная индуктивность представляется комплексным сопротивлением, в котором ток опережает напряжение на 90° . Некоторые структурные схемы таких устройств [6] показаны на рис. 9.12.

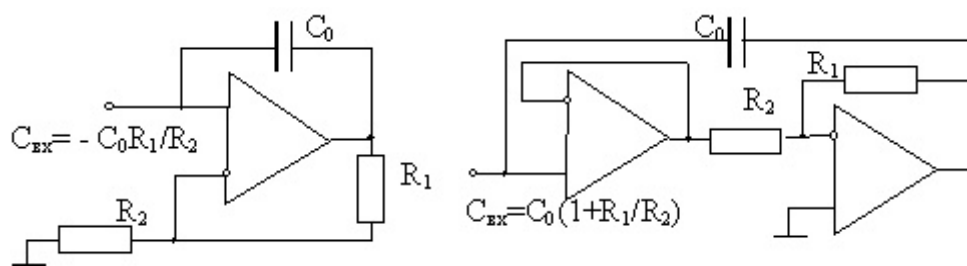


Рис. 9.12. Схемы конверторов емкостного сопротивления

Схемы сравнения на основе операционных усилителей. Большой собственный коэффициент усиления позволяет построить эффективные схемы сравнения двух напряжений, применяемые в различных устройствах автоматики [26]. На основе ОУ можно построить как однопороговые, так и гистерезисные схемы сравнения. Передаточные характеристики таких схем представлены на рис. 9.13 и 9.14.

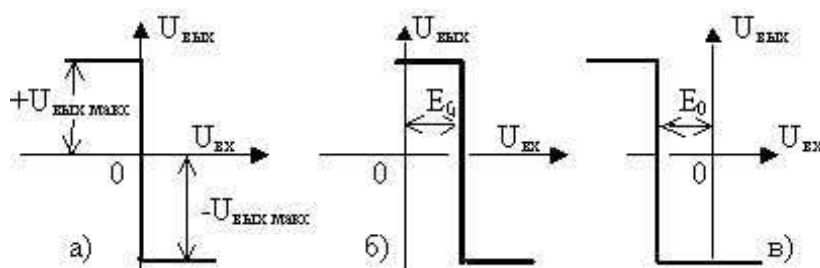


Рис. 9.13. Идеальные передаточные характеристики однопороговой схемы сравнения:

a – для идеального ОУ без внешнего смещения;
б – с положительным смещением, *в* – с отрицательным смещением

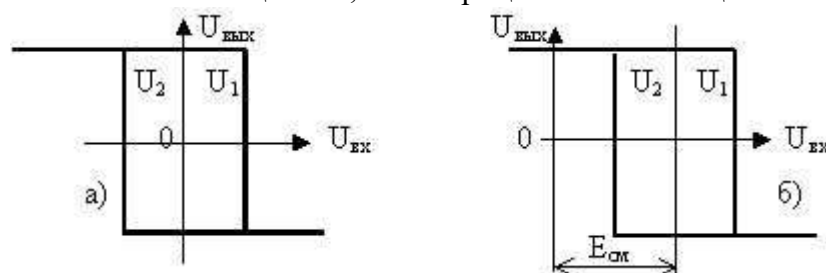


Рис. 9.14. Передаточные гистерезисные характеристики:

a – симметричная без смещения; *б* – со смещением

Передаточные характеристики, показанные на рис. 9.13 и 9.14, могут быть получены, если использовать ОУ без обратной связи или с положительной обратной связью. При этом ОУ по свойствам должен приближаться к идеальному: $K_{OY} \rightarrow \infty$, $R_{BX} \rightarrow \infty$, $R_{ВЫХ} \rightarrow 0$. Согласно основному уравнению для усилителя с обратной связью имеем:

$$K_{oc} = \frac{K_{OY}}{1 - b_{oc} \cdot K_{OY}}, \quad (9.7)$$

где b_{OC} – коэффициент обратной связи;

K_{OY} – собственный коэффициент усиления ОУ;

K_{OC} – коэффициент усиления схемы.

Если $b_{OC} = 0$ (отсутствует ОС), то $K_{OC} = K_{OY}$, причем при достаточно большом значении K_{OY} напряжение на выходе ОУ появится при нулевом значении напряжения на его входах. Работа ОУ в таком режиме имеет только теоретическое значение. Для того чтобы построить схему сравнения, нужно использовать факт перехода ОУ из одного состояния в другое при разности напряжений на входах, близкой к нулю. Сравнимые напряжения подают на инвертирующий и неинвертирующий входы, а момент их равенства будет зафиксирован скачкообразным изменением напряжения на выходе. Структурные схемы, позволяющие осуществить сравнение одного напряжения с другим (в том числе и с нулем), показаны на рис. 9.15.

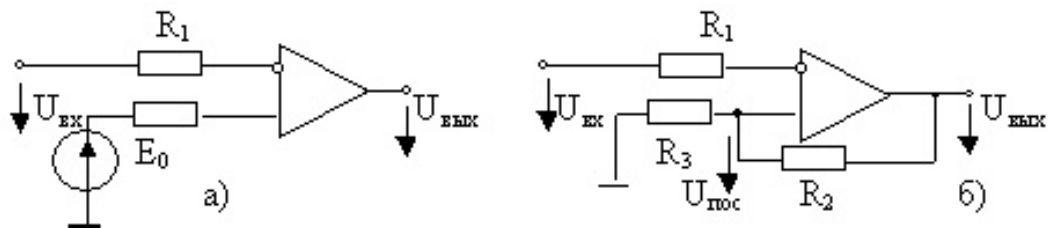


Рис. 9.15. Структурные схемы сравнения напряжений:

а – ОУ без цепи обратной связи с высоким K_{OY} , б – ОУ с положительной ОС

В схеме на рис. 9.15, а входное напряжение $U_{ВХ}$ сравнивается с опорным напряжением E_0 . В схеме на рис. 9.15, б входное напряжение $U_{ВХ}$ сравнивается с напряжением $U_{ПОС}$, образованным из выходного напряжения резистивным делителем R_2R_3 .

Схема сравнения может быть построена на ОУ без обратной связи при подаче сравниваемых напряжений на один неинвертирующий вход, если одно из сравниваемых напряжений (или оба) имеют знакопеременный характер изменения. Схема такого устройства сравнения приведена на рис. 9.16.

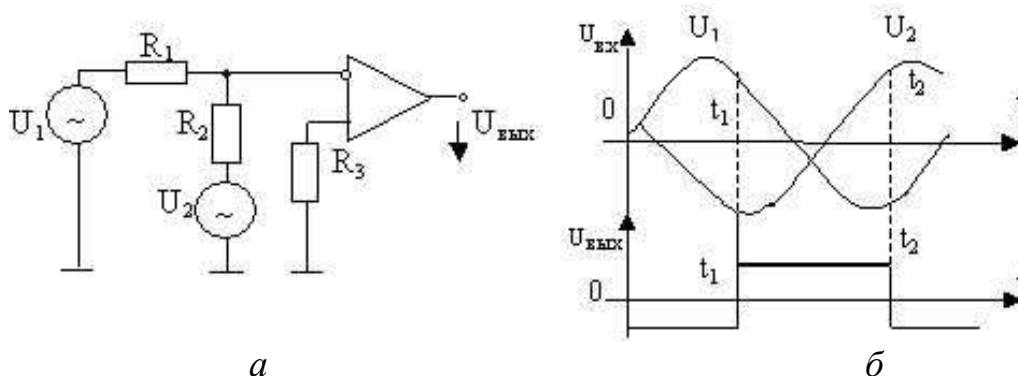


Рис. 9.16. Структурная схема сравнения знакопеременных напряжений (а) и временные диаграммы сигналов (б)

Переключение схемы будет происходить в моменты t_1 , t_2 , когда

$$\frac{U_1(t)}{R_1} = \frac{U_2(t)}{R_2}, \quad (9.8)$$

где $U_1(t)$, $U_2(t)$ – текущие (мгновенные) значения сравниваемых напряжений.

Если выбрать $R_1=R_2$, переключение будет происходить в моменты равенства абсолютных значений противоположных по знаку напряжений (в предположении, что внутренние сопротивления источников напряжений одинаковы).

Если $b_{OC} \neq 0$ и имеет положительный знак, то согласно (9.7), коэффициент передачи схемы увеличивается, при этом гистерезисную характеристику (рис. 9.14) можно получить при $b_{OC} > 1/K_{OY}$.

В схеме (рис. 9.15, б) на инвертирующий вход подано изменяющееся по абсолютному значению и знаку напряжение U_{BX} , а цепь ПОС образована делителем R_2R_3 . На неинвертирующем входе будет образовано напряжение:

$$|U_{ПОС}| = |U_{ВЫХ\ MAX}| \cdot \frac{R_3}{(R_2 + R_3)}. \quad (9.9)$$

Знак этого напряжения будет определяться знаком выходного напряжения ОУ, находящегося в состоянии положительного или отрицательного ограничения. Если, например, на выходе ОУ напряжение соответствует уровню положительного ограничения (на выходе присутствует положительное $U_{ВЫХ\ MAX}$), подача отрицательного напряжения U_{BX} не будет изменять состояние схемы до тех пор, пока $|U_{BX}| < |U_{ПОС}|$. В момент, когда $|U_{BX}| = |U_{ПОС}|$ произойдет изменение выходного напряжения ОУ от $+U_{ВЫХ\ MAX}$ до $-U_{ВЫХ\ MAX}$, а на неинвертирующем входе установится напряжение:

$$U_{ПОС} = -U_{ВЫХ\ MAX} \cdot \frac{R_3}{(R_2 + R_3)}. \quad (9.10)$$

Таким образом, устойчивые состояния при наличии ПОС в рассматриваемой схеме будут устанавливаться каждый раз после перехода входного напряжения через пороговые значения $U_{ПОС}$, определяемые выражениями (9.9), (9.10). Анализ работы схемы с идеальным ОУ и цепью ПОС показывает, что передаточная характеристика будет иметь вид, представленный на рис. 9.14, а, где U_1 и U_2 определяются по выражению (9.10).

Смещение характеристики по горизонтальной оси относительно начала координат можно осуществить подачей дополнительного напряжения смещения на тот или иной вход. Если напряжение смещения положительное, то подача его на неинвертирующий вход смещает характеристику вправо (рис. 9.14, б), а подача его на инвертирующий вход смещает характеристику влево. Смещение характеристики влево можно осуществить подачей отрицательного смещения на неинвертирующий вход.

Следует заметить, что подачу напряжения смещения нужно выполнять через резистор, сопротивление которого должно быть значительно больше сопротивлений, используемых для реализации характеристик. Структурные схемы, реализующие такие характеристики, показаны на рис. 9.17.

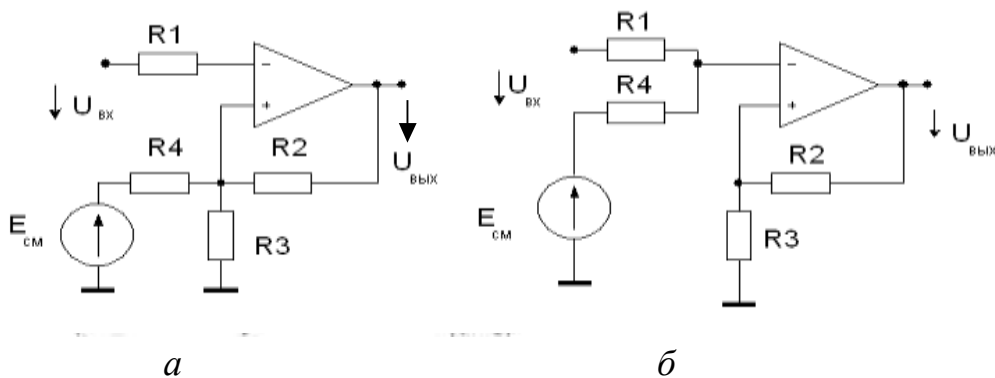


Рис. 9.17. Гистерезисные структурные схемы:

а – напряжение смещения подано на неинвертирующий вход;

б – напряжение смещения подано на инвертирующий вход

Аналоговый компаратор. Построение схем сравнения повышенной чувствительности на ОУ, как на дискретном элементе, встречает определенные трудности. Значительно лучшими характеристиками обладают интегральные схемы сравнения двух напряжений, называемые *аналоговыми компараторами*.

Компаратором принято называть интегральную схему, предназначенную для сравнения двух напряжений и выдачи результата сравнения в виде напряжения, соответствующего логическим уровням «0» или «1». Аналоговый компаратор служит связующим звеном между аналоговой и цифровой частями схемы.

В структурной схеме компаратора, помимо операционного усилителя, есть дополнительные элементы, обеспечивающие выполнение основной функции сравнения и функции преобразования уровня выходного напряжения в соответствии с результатом сравнения. Передаточные характеристики и упрощенная структурная схема компаратора [14] показаны ниже на рис. 9.18.

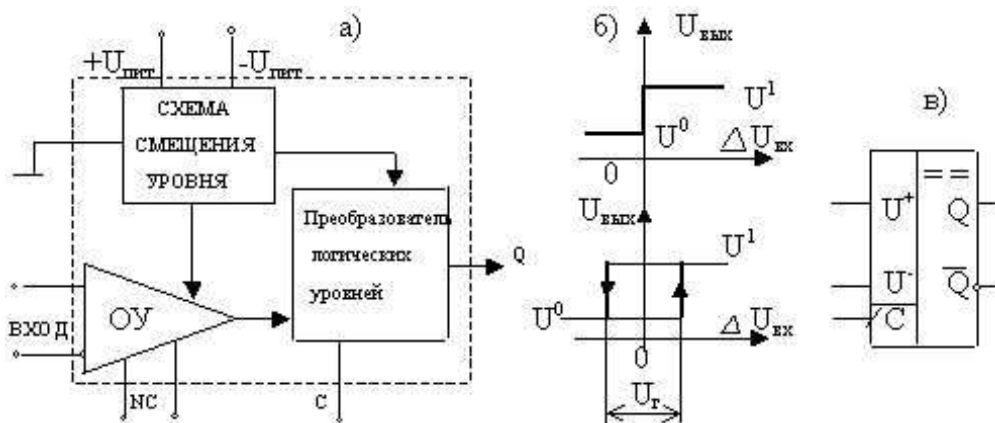


Рис. 9.18. Структурная схема (*а*), передаточные характеристики (*б*) и УГО (*в*) аналогового компаратора:

NC – выводы для коррекции нулевого уровня (балансировки); C – вход тактирования;

U^0 , U^1 – логические уровни выходного сигнала; Q – обозначение выхода;

U^+ , U^- – обозначения входных зажимов; $U_Г$ – ширина петли гистерезисной характеристики

Условия работы компаратора определяются следующим образом:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} U^1, \text{при } U^+ > U^- \text{ или } \Delta U_{\text{ВХ}} > 0; \\ U^0, \text{при } U^+ < U^- \text{ или } \Delta U_{\text{ВХ}} < 0. \end{cases}$$

Наличие гистерезиса в выходной характеристике компаратора обусловлено погрешностью сравнения уровней входных напряжений, а величина напряжения U_{Γ} характеризует его чувствительность и может составлять несколько мВ. Важнейшими параметрами компаратора являются:

- пороговая чувствительность – минимальный разностный сигнал, который способен идентифицировать компаратор;
- входные и выходные токи;
- коэффициент ослабления синфазного сигнала – отношение величины синфазного напряжения к дифференциальному сигналу, вызывающему срабатывание компаратора, (измеряется в дБ);
- быстродействие (время переключения), характеризуемое промежутком времени от момента подачи входного сигнала $\Delta U_{\text{ВХ}}$ до момента достижения выходным сигналом логического уровня U^0 или U^1 .

Современные аналоговые компараторы имеют время переключения несколько десятков нс при пороговой чувствительности около 0,25 мВ.

9.6. Области применения операционных усилителей в электронных схемах

Области использования ОУ весьма разнообразны. Приведенный ниже перечень устройств не охватывает все возможные случаи использования ОУ.

1. В линейных частотно-независимых и частотно-зависимых схемах:

- а) инвертирующие и неинвертирующие масштабные усилители;
- б) усилители с регулируемым усилением и повторители напряжения;
- в) специальные дифференциальные и мостовые усилители;
- г) стабилизаторы тока и напряжения;
- д) усилители тока фотоэлементов и электрометрические усилители;
- е) интеграторы, дифференциаторы, фазовращатели, активные фильтры;

2. Схемы с нелинейными и управляемыми обратными связями.

а) формирователи импульсов, ограничители, функциональные преобразователи;

б) прецизионные и фазочувствительные выпрямители, детекторы и компараторы;

в) логарифмические и антилогарифмические усилители;

г) аналоговые умножители и делители, широтно-импульсные модуляторы;

д) аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП);

е) автогенераторы, мультивибраторы, генераторы синусоидальных колебаний;

ж) преобразователи напряжения в частоту и частоты в напряжение.

10. ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И ЭЛЕКТРОННЫЕ КЛЮЧИ

10.1. Общие сведения

Генератор колебаний – это устройство, посредством которого энергия источника питания преобразуется в электрические колебания нужной формы, частоты и мощности.

Генераторы классифицируют по следующим признакам: частоте, форме колебаний, назначению, выходной мощности, типу активного элемента, виду цепей обратной связи.

По частоте различают инфранизкочастотные генераторы (частота генерации меньше 10 Гц), низкочастотные (от 10 Гц до 100 кГц), высокочастотные (от 100 кГц до 100 МГц), сверхвысокочастотные (выше 100 МГц). По форме колебаний различают генераторы гармонических и негармонических (импульсных) сигналов. По виду цепей обратной связи различают LC -, RC -, RL -генераторы. По используемым активным элементам генераторы подразделяют на транзисторные, ламповые, на операционных усилителях, диодах и др. [12].

Генератор колебаний можно представить нелинейным устройством, обобщенная структурная схема которого имеет вид, показанный на рис. 10.1.

Схема содержит усилитель с коэффициентом усиления K , цепь отрицательной обратной связи с коэффициентом передачи m и цепь положительной обратной связи с коэффициентом передачи β . Различают два этапа после включения питания: этап возбуждения и этап стационарного режима. На первом этапе основную роль играет цепь положительной обратной связи (ПОС), которая обычно выполняется на пассивных элементах и имеет потери.

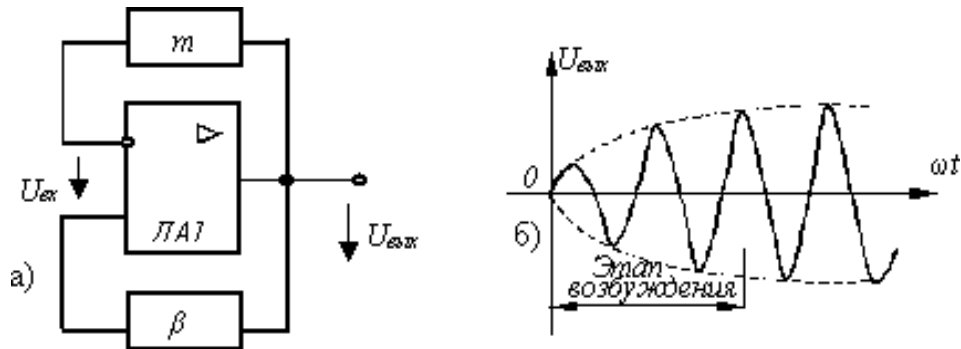


Рис. 10.1. Структурная схема генератора с внешней обратной связью (а) и процесс установления колебаний (б)

После подачи питания в схеме возникают колебания, обусловленные нестационарными (переходными) процессами – зарядом емкостей, нарастанием тока в индуктивностях, переходными процессами в транзисторах или операционных усилителях. Эти колебания появляются на входе в виде сигнала $U_{\text{вх}}$ и на выходе усилителя в виде сигнала $U_{\text{вых}} = KU_{\text{вх}}$. С выхода усилителя колебания через цепь ПОС поступают на вход усилителя, т.е.

$$U_{\text{вх}} = \beta U_{\text{вых}}.$$

Сравнение выражений для $U_{\text{вых}}$ приводит к равенству $U_{\text{вых}} = \beta KU_{\text{вых}}$, откуда следует, что для возбуждения колебаний должно соблюдаться условие

$$\beta K = 1. \quad (10.1)$$

Произведение βK называется *петлевым усилением* усилителя с обратной связью. Это условие распадается на два, которые называют *условиями баланса амплитуд и фаз*:

$$|K\beta| = 1; \quad (10.2)$$

$$\arg(K\beta) = \varphi_K + \varphi_\beta = 0, \quad (10.3)$$

где φ_K и φ_β – сдвиг по фазе, соответственно, для прямой и обратной передачи усиливаемого сигнала.

Условие (10.2) означает, что модуль коэффициента усиления усилителя должен быть равен модулю обратной величины коэффициента передачи звена ПОС, т.е. насколько сигнал ослабляется при передаче через цепь ПОС, настолько он должен быть усилен при прохождении через усилитель.

Если $K < \beta^{-1}$, то колебания в схеме генератора будут затухающими и наоборот. Цепь отрицательной обратной связи служит для точного выполнения условия баланса амплитуд.

Условие (10.3) называют условием баланса фаз. Оно означает, что полный фазовый сдвиг между колебаниями на входе и выходе в замкнутом контуре генератора должен быть равен $2\pi n$, где n – любое целое число. Если условие (10.3) соблюдается только на одной частоте, то (при выполнении условия баланса амплитуд) колебания будут гармоническими. Если условия баланса фаз выполняются для нескольких частот, колебания будут негармоническими.

10.2. Генераторы гармонических сигналов

Широкое распространение получили схемы генераторов, имеющих название трехточечных. Одна из них приведена на рис. 10.2.

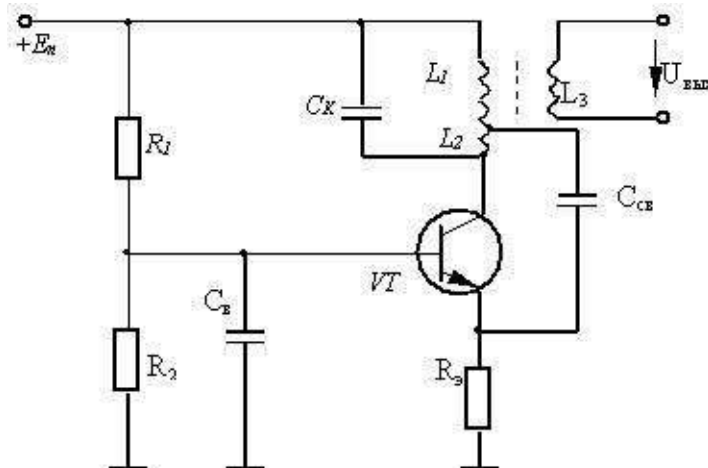


Рис. 10.2. Схема индуктивного трехточечного генератора на биполярном транзисторе

Колебания возникают в контуре C_k, L_1, L_2 , а часть напряжения через конденсатор связи $C_{св}$ подается во входную эмиттерную цепь транзистора, образуя положительную обратную связь.

Сопротивления R_1 и R_2 обеспечивают выбор рабочей точки транзистора по постоянному току. Выходное напряжение снимается с дополнительной индуктивной обмотки. Генераторы с LC -контурами используются в основном на высокой частоте. На низких частотах обычно используют генераторы с RC -цепями в звеньях ПОС. Часто используется цепь, называемая мостом Вина, схема которой изображена на рис. 10.3.

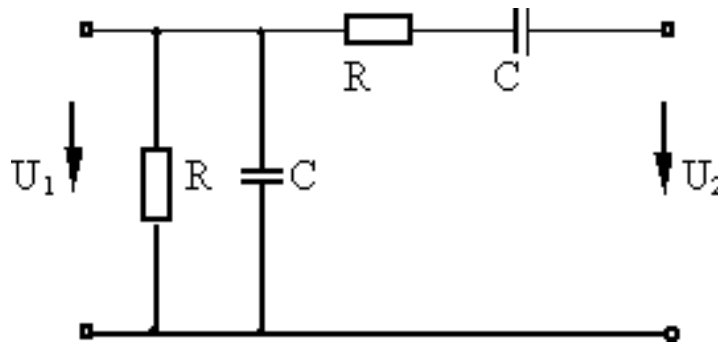


Рис. 10.3. Схема моста Вина

Мост Вина состоит из двух RC -звеньев: первое звено образовано последовательным соединением конденсатора и резистора и имеет сопротивление:

$$z_1 = R + \frac{1}{j\omega C}.$$

Второе звено образовано параллельным соединением таких же элементов и имеет сопротивление:

$$z_2 = \frac{R \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega RC}.$$

Схема генератора гармонических колебаний с мостом Вина показана на рис. 10.4. Мост Вина образует цепь ПОС с коэффициентом передачи:

$$\theta = \frac{z_2}{z_1 + z_2} = \frac{1}{1 + \frac{(1 + j\omega RC)(1 + j\omega RC)}{j\omega RC}} = \frac{j\omega RC}{1 + 3j\omega RC - C^2 R^2 \omega^2}. \quad (10.4)$$

Если выполнить условие $1 - C^2 R^2 \omega^2 = 0$, т.е. $\omega = \frac{1}{CR}$, то фазовый сдвиг будет равен нулю, а модуль коэффициента обратной связи $\beta = \frac{1}{3}$. Частота генерации будет определяться выражением:

$$f = \frac{1}{2RC\pi}. \quad (10.5)$$

Стабилизацию амплитуды в таком генераторе обеспечивают с помощью нелинейной цепи отрицательной обратной связи R_1 , R_2 . В качестве нелинейного сопротивления можно использовать миниатюрную лампочку накаливания.

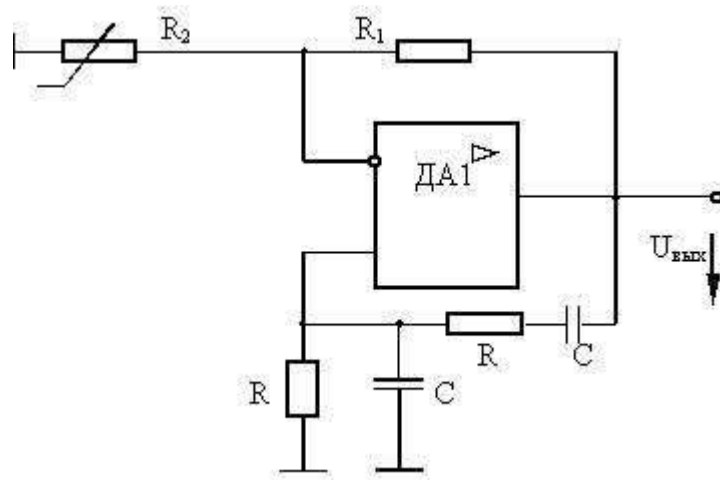


Рис. 10.4. Схема генератора с мостом Вина

При этом с увеличением выходного напряжения ток в цепи R_1 , R_2 увеличивается, что приводит к увеличению сопротивления нити лампы накаливания и возрастанию глубины отрицательной обратной связи:

$$m = R_2 / (R_1 + R_2). \quad (10.6)$$

Увеличение глубины отрицательной обратной связи приводит к замедлению увеличения выходного напряжения, в результате чего амплитуда выходного напряжения стабилизируется.

10.3. Кварцевые генераторы

В кварцевых генераторах в качестве элемента колебательного контура используется кристалл кварца (кварцевый резонатор), имеющий высокостабильную собственную резонансную частоту.

Схема замещения кварцевого резонатора представлена на рис. 10.5, *а*. Кварцевый генератор может быть построен по схеме, приведенной на рис. 10.5, *б*.

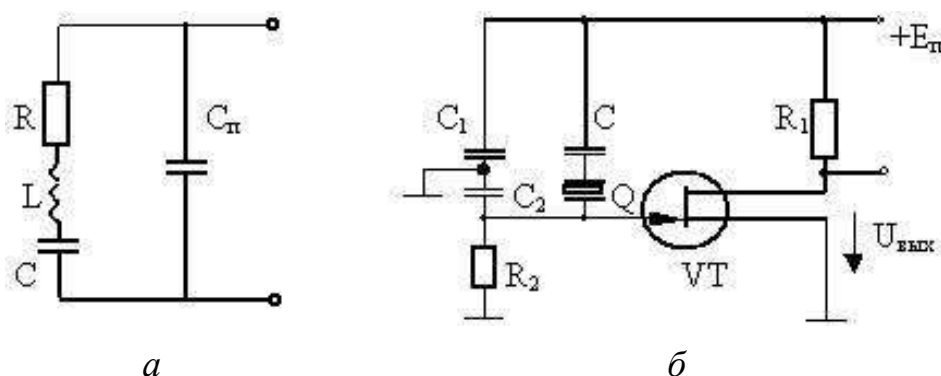


Рис. 10.5. Схема замещения кварца (*а*)
и схема кварцевого генератора (*б*)

В схеме замещения кварцевого резонатора (рис. 10.5) L – эквивалентная индуктивность кварца, R – сопротивление потерь, C – последовательная емкость, C_n – параллельная емкость. В изображенном контуре (рис. 10.5, *а*) наблюдаются две резонансные частоты: резонанса токов и резонанса напряжений. Для кварца эти частоты практически совпадают, поэтому частотная характеристика кварцевого резонатора имеет резко выраженный максимум. В схеме кварцевого генератора (рис. 10.5, *б*) ПОС обеспечивается за счет того, что кварц вносит дополнительный фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями. Конденсаторы C_1 и C_2 включаются для улучшения условий возбуждения. Основное преимущество кварцевых генераторов – высокая стабильность частоты колебаний. Например, стабильность частоты RC -генераторов имеет величину около 0,1 %, LC -генераторов – около 0,01 %, а кварцевый генератор имеет стабильность $(10^{-4} - 10^{-5})$ % [14].

10.4. Генераторы колебаний прямоугольной формы (мультивибраторы)

Принцип получения сигналов с прямоугольной формой напряжения поясним на примере использования схемы *KP1006BII1*, называемой интегральным таймером [6]. Таймерами называют устройства, предназначенные для получения точных интервалов времени или по-

следовательности импульсов со стабильными частотами. Упрощенная схема интегрального таймера изображена на рис. 10.6.

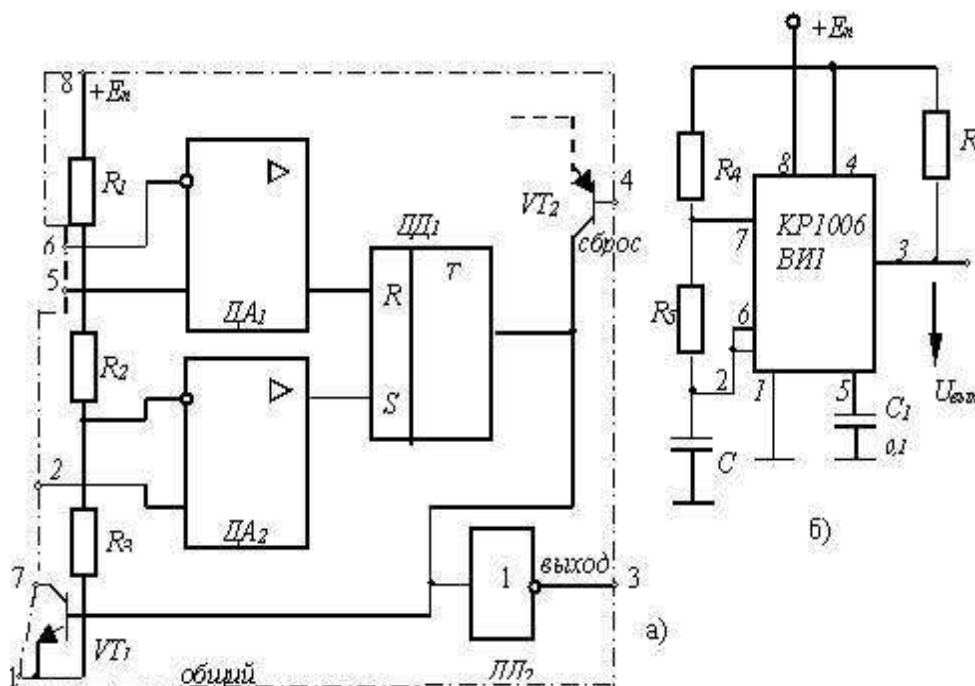


Рис. 10.6. Упрощенная схема таймера *KP1006BII* (а) и его включение мультивибратором (б)

Схема содержит делитель напряжения, составленный из одинаковых резисторов R_1 , R_2 , R_3 , два компаратора DA_1 , DA_2 , выполненные на основе схем операционных усилителей, RS -триггер DD_1 , инвертор DD_2 , разрядный ключ на транзисторе VT_1 , ключ сброса VT_2 (показан условно).

При подаче напряжения на таймер конденсатор C (рис. 10.6, б) заряжается по цепи R_4 , R_5 , C до напряжения $U = \frac{2}{3} U_n$, при котором срабатывает компаратор DA_1 . Компаратор DA_1 устанавливает триггер DD_1 в такое положение, при котором на его выходе появляется сигнал, включающий ключ VT_1 . При этом обеспечивается создание цепи разряда конденсатора через резистор R_5 и транзистор VT_1 . При достижении напряжением на конденсаторе значения $1/3 E_n$ срабатывает компаратор DA_2 и через вход S триггера DD_1 устанавливает триггер в исходное положение, при котором на его выходе образуется низкое напряжение, ключ VT_1 закрывается. Начинается заряд конденсатора до напряжения $2/3 U_n$. В схеме устанавливаются устойчивые колеба-

ния. На выходе инвертора DD_2 получим прямоугольные импульсы, амплитуда которых определяется напряжением питания.

Длительность стадий заряда T_1 и разряда T_2 конденсатора C можно определить как

$$\begin{aligned} T_1 &= 0,693(R_4 + R_5)C, \\ T_2 &= 0,693R_5C \end{aligned} \quad (10.7)$$

Частота генерируемых импульсов определяется выражением:

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2} \approx \frac{1,443}{(2R_5 + R_4)C} \quad (10.8)$$

Скважность импульсов определяется формулой:

$$Q = R_5 / (R_4 + 2R_5). \quad (10.9).$$

При изменении емкости конденсатора от 0,001 до 100 мкФ и суммарного сопротивления $(R_4 + 2R_5)$ от 1 кОм до 10 мОм можно получить любые частоты в диапазоне от 0,1 Гц до 100 кГц [6].

Следует отметить, что на основе рассмотренной схемы таймера можно собрать различные устройства, такие как ждущий мультивибратор, делитель частоты, широтно-импульсный и фазо-импульсный модуляторы и другие.

Мультивибраторы на операционных усилителях и логических элементах. Генераторы прямоугольных импульсов с невысокими требованиями к стабильности могут быть выполнены на операционном усилителе. Примером может быть схема, показанная на рис. 10.7.

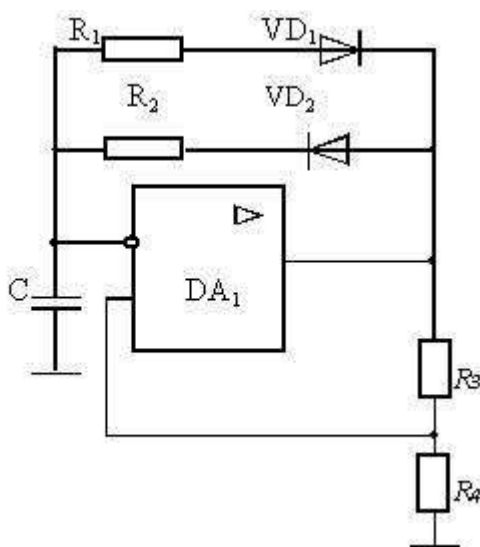


Рис. 10.7. Схема мультивибратора на операционном усилителе

Усилитель $ДА_1$ работает в режиме регенеративного компаратора, т.е. в режиме, при котором полярность и значение опорного напряжения изменяются в зависимости от полярности выходного сигнала. В схеме имеется положительная обратная связь, обеспечиваемая делителем R_3, R_4 , а выходное напряжение может принимать два устойчивых значения: $U_{вых. max}^+$ и $U_{вых. max}^-$.

Коэффициент передачи цепи ПОС:

$$\gamma = \frac{R_4}{R_3 + R_4}.$$

В зависимости от исходного состояния ОУ напряжение на неинвертирующем входе будет

$$U_1 = U_{вых. max}^- \gamma \quad (10.10)$$

или

$$U_2 = U_{вых. max}^+ \gamma.$$

Компаратор срабатывает в моменты, когда напряжение на конденсаторе достигает значения U_1 или U_2 .

Если на выходе ОУ было отрицательное напряжение, конденсатор разряжается по цепи: общий провод – резистор R_1 – диод VD_1 . Если на выходе ОУ было положительное напряжение, конденсатор перезаряжается по цепи R_2, VD_2 . Время заряда и разряда определяются приближенно по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} T_1 &= R_1 C \ln \frac{U_{вых. max}^+ + |U_{вых. max}^-| \gamma}{U_{вых. max}^+ (1 - \gamma)}, \\ T_2 &= R_2 C \ln \frac{|U_{вых. max}^-| + U_{вых. max}^+ \gamma}{|U_{вых. max}^-| (1 - \gamma)}. \end{aligned} \quad (10.11)$$

Частота колебаний определяется по формуле:

$$f = 1 / (T_1 + T_2). \quad (10.12)$$

Мультивибратор удовлетворительно работает в диапазоне частот от нескольких Гц до 100 кГц. Выбирая параметры R_1, R_2, C , можно менять не только частоту, но и скважность выходных импульсов.

Стабильность частоты колебаний генератора на основе ОУ может быть существенно повышена, если в качестве реактивного элемента использовать кварцевый резонатор. Схема такого генератора приведена на рис. 10.8.

Кварцевый резонатор включен в цепь ООС. Глубина ООС определяется соотношением:

$$M = R_2 / (R_2 + Z), \quad (10.13)$$

где Z – эквивалентное сопротивление параллельно соединенных резистора R_1 и кварцевого резонатора Q .

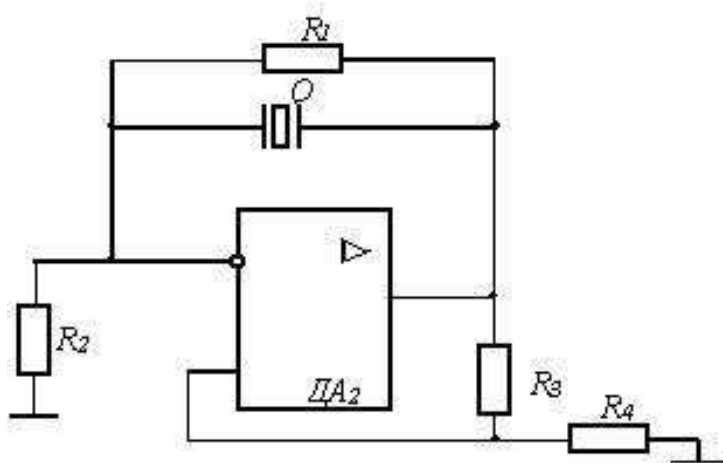


Рис. 10.8. Генератор колебаний на ОУ с кварцевым резонатором

Глубина ПОС определяется соотношением: $\gamma = R_4 / (R_3 + R_4)$.

На резонансной частоте полное сопротивление кварцевого резонатора, а следовательно и эквивалентного сопротивления Z , резко увеличивается, глубина ООС уменьшается. Если результирующее значение обратной связи окажется положительным и $K\gamma > 1$, то генератор возбудится. Ограничение амплитуды осуществляется за счет свойств ОУ.

Мультивибраторы часто выполняют на логических элементах (рис. 10.9). Логические элементы (ЛЭ) схемно представляют собой усилители с большим коэффициентом усиления, у которых имеются два входных пороговых значения $U_{вх.пор}^0, U_{вх.пор}^1$. Следовательно, обеспечив положительную обратную связь, как на схеме рис. 10.7, при наличии реактивного элемента, можно получить процесс генерации колебаний подобно тому, как было рассмотрено ранее.

При этом можно использовать кварцевую стабилизацию частоты. Промышленность выпускает интегральные схемы мультивибраторов, с помощью которых можно получать колебания с частотой от долей Гц до 80 МГц [22].

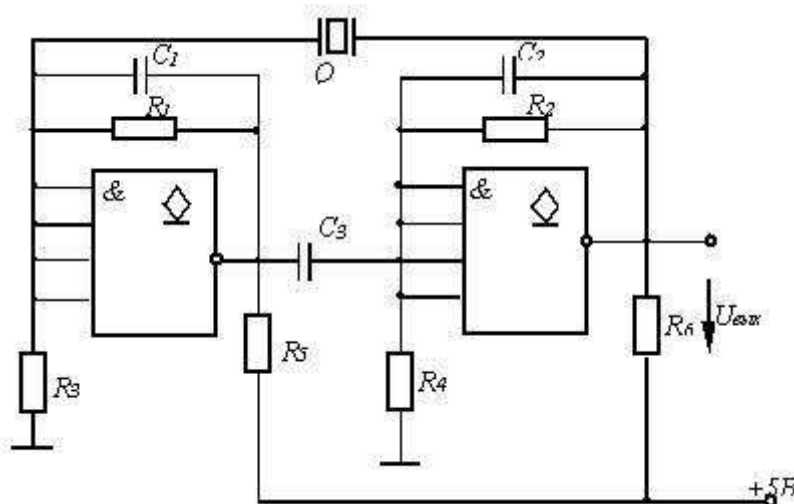


Рис. 10.9. Мультивибратор на логических элементах *K155ЛА7*

В схеме использован кварцевый резонатор для повышения стабильности частоты колебаний. ЛЭ выполняют функции усилителей. Усилители охвачены ООС, обеспечиваемой резисторами R_1 , R_2 и R_3 , R_4 . Конденсаторы C_1 и C_2 включены для устранения паразитного возбуждения. Конденсатор C_3 введен для развязки по постоянному току выхода микросхемы DD_1 от входа микросхемы DD_2 . Положительная обратная связь обеспечивается за счет фазового сдвига, осуществляемого кварцевым резонатором. Так как ЛЭ *K155ЛА7* имеет открытый коллектор, то в цепях выходов имеются резисторы R_5 и R_6 . В зависимости от соотношения параметров колебания могут быть синусоидальными либо несинусоидальными. Стабильность частоты генерации при этом сохраняется.

10.5. Импульсные сигналы

Импульсный принцип построения систем занимает доминирующее положение по сравнению с аналоговым. В импульсных системах используются сигналы (напряжение, ток) импульсной формы. Наиболее распространены импульсы, близкие по форме к прямоугольной, пилообразной и экспоненциальной, они мо-

гут быть положительной, отрицательной или чередующейся полярности (рис. 10.10).

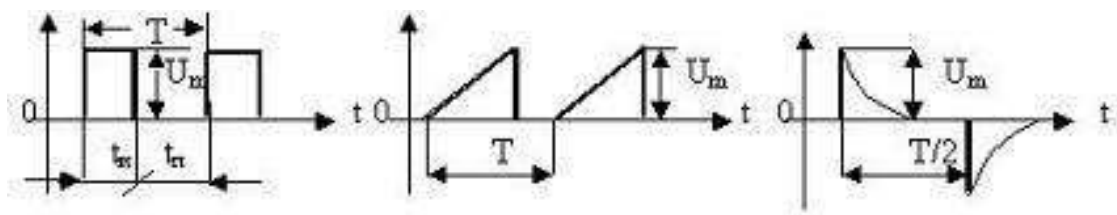


Рис. 10.10. Примеры электрических импульсов различной формы:

U_m – амплитуда, T – период импульсной последовательности,

t_n – ширина (длительность) импульса,

t_n – длительность паузы

Импульсными называются устройства, предназначенные для генерирования, формирования, преобразования и передачи импульсных сигналов.

Параметры электрического импульса. *Электрическим импульсом* называют кратковременное скачкообразное изменение напряжения или силы тока. Все электрические импульсы принято разделять на видеоимпульсы и радиоимпульсы (рис. 10.11).

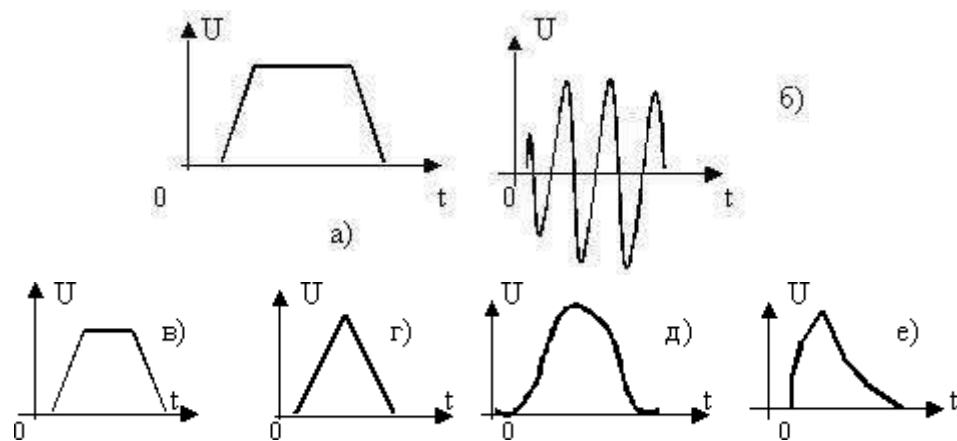


Рис. 10.11. Примеры видеоимпульсов (а, в – е) и радиоимпульса (б)

На рис. 10.11 представлены распространённые формы импульсов: трапецидальная (а, в), треугольная (г), колоколообразная (д), пилообразная (е).

Однополярные электрические импульсы называют видеоимпульсами. Они не содержат высокочастотных колебаний. Электрические импульсы, представляющие собой ограниченные во времени

ВЧ или СВЧ электромагнитные колебания, огибающая которых имеет форму видеоимпульса, называют радиоимпульсами.

Принято различать следующие участки импульса: фронт, вершина, срез, основание. Срез называют иногда задним фронтом.

Основные параметры видеоимпульса (рис. 10.12):

- 1) высота импульса (амплитуда) – A ;
- 2) спад вершины импульса – ΔA ;
- 3) длительность импульса $t_{\text{и}}$, определяют на уровне $0,1A$;
- 4) время установления или нарастания фронта импульса (длительность фронта импульса) $t_{\text{ф}}$ – время нарастания сигнала от уровня $0,1$ до уровня $0,9$ своего максимального значения;
- 5) длительность среза $t_{\text{с}}$ определяется аналогично $t_{\text{ф}}$;
- 6) длительность вершины импульса $t_{\text{в}}$ – на уровне $0,9A$;
- 7) активная длительность импульса $t_{\text{иа}}$ – на уровне $0,5A$.

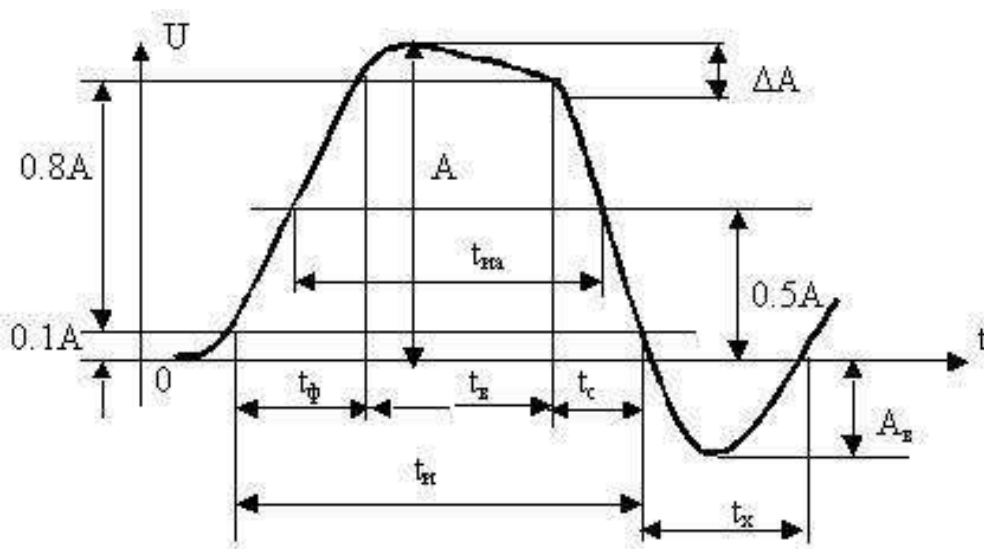


Рис. 10.12. Иллюстрация параметров видеоимпульса

Выброс, образующийся чаще всего после спада, называют хвостом импульса, который характеризуется длительностью $t_{\text{х}}$ и амплитудой выброса $A_{\text{в}}$. В этом случае расчетная длительность среза $t_{\text{с}}$ должна быть увеличена. Периодическую последовательность импульсов характеризуют следующими параметрами:

- 1) периодом повторения импульсов T ;
- 2) частотой повторения импульсов $f = 1/T$;
- 3) скважностью импульсов $Q = T/t_{\text{и}}$, $Q > 1$;
- 4) коэффициентом заполнения $K_3 = 1/Q = t_{\text{и}}/T$, $K_3 < 1$.

Устройства, в которых выполняются основные виды преобразований импульсных сигналов, разделяются на несколько видов:

а) электрические цепи, обеспечивающие неискаженную передачу импульсов – линии передачи, кабели, трансформаторы, линии задержки, усилители импульсов (видеоусилители);

б) устройства преобразования импульсов обеспечивают получение импульсов одной формы из импульсов другой формы или той же формы, но с другими параметрами:

- линейные преобразователи (интегрирующие и дифференцирующие устройства);

- нелинейные формирующие устройства (ограничители, компараторы, триггеры Шмитта, формирователи);

- преобразователи импульсов цифровых устройств, предназначенные для выполнения логических функций и преобразований одной последовательности импульсов в другую (логические элементы, триггеры, счетчики, регистры, комбинационные устройства);

в) импульсные генераторы (автогенераторы, мультивибраторы, одновибраторы, синхронизируемые генераторы, делители частоты).

Основу всех этих устройств составляют электронные ключи.

10.6. Электронные ключи

Ключи на биполярных транзисторах. Вся импульсная и цифровая техника базируется на работе транзистора в качестве *ключа* – устройства, коммутирующего электрическую цепь. Основой всех узлов и схем импульсной и цифровой техники является так называемая ключевая схема – каскад на транзисторе, работающем в ключевом режиме (рис. 10.13). Транзистор может включаться по схемам ОЭ, ОК, ОБ.

Режим запираания (отсечки) осуществляется подачей на вход транзистора напряжения положительной полярности (согласно стрелке на рис. 10.13) $U_{\text{вх}} > 0$. Эмиттерный переход под действием этого напряжения запирается и его ток равен 0. Вместе с тем через резистор R_6 протекает обратный (тепловой) ток коллекторного перехода $I_{\text{к0}}$. Этому режиму на выходных характеристиках транзистора соответствует точка M_3 (рис. 10.13). Величину запирающего входного напряжения $U_{\text{вх.зап}}$ выбирают такой, чтобы при протекающем через R_6 тепловом токе выполнялось условие:

$$U_{бэ} = (U_{вх.зап} - I_{к0} R_б) > 0. \quad (10.14)$$

Режим открытого состояния транзистора достигается изменением полярности входного напряжения ($U_{вх} < 0$) и заданием соответствующего тока базы. С изменением полярности входного напряжения увеличению тока базы будет соответствовать увеличение тока коллектора, чему соответствует условное перемещение на характеристиках точки M из положения M_3 вверх по линии нагрузки, при этом $U_{кэ}$ уменьшается по модулю.

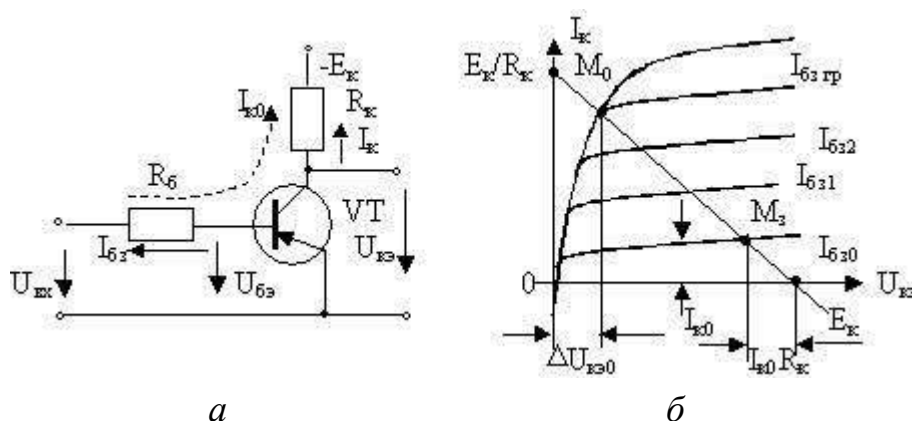


Рис. 10.13. Схема электронного ключа (а) и графическая иллюстрация его состояния (б)

До некоторого граничного значения тока базы $I_{бзгр}$ сохраняется известная зависимость между током коллектора $I_к$ и током базы $I_{бз}$:

$$I_к \approx \beta I_{бз},$$

где β – статический (усредненный) коэффициент передачи тока транзистора в схеме ОЭ.

При токе базы $I_{бзгр}$ будет «полное» открытие транзистора. При этом в точке M_0 : $I_к = (E_к - \Delta U_{кэ0}) / R_к$, где $\Delta U_{кэ0}$ – остаточное напряжение на транзисторе в открытом состоянии.

$\Delta U_{кэ0}$ является существенным параметром транзистора в импульсном режиме, причём оно должно быть минимальным. Обычно $\Delta U_{кэ0} = (0,5 - 1)$ В. Тогда граничное значение тока базы открытого транзистора:

$$I_{бз гр} = I_к / \beta \cong E_к / (R_к \cdot \beta). \quad (10.15)$$

При дальнейшем увеличении тока базы остаточное напряжение остается практически неизменным. Режим работы открытого транзи-

стора при $I_{\text{бз}} > I_{\text{бз гр}}$ называют насыщенным, а отношение $S = I_{\text{бз}}/I_{\text{бз гр}}$ — коэффициентом насыщения транзистора. С целью надежного обеспечения режима насыщения обычно выбирают $S = (1,5 - 3)$.

Процессы, протекающие в ключевой схеме, при условии, что входной импульс напряжения имеет идеальную прямоугольную форму, можно представить импульсными диаграммами сигналов, показанными на рис. 10.14.

На интервале $0 - t_1$ транзистор заперт напряжением $U_{\text{вхз}}$. Напряжение на транзисторе $U_{\text{кэ}} = -(E_{\text{к}} - I_{\text{к60}} \cdot R_{\text{к}})$. При появлении импульса (момент t_1) ток $I_{\text{к}}$ начинает нарастать, а напряжение $U_{\text{кэ}}$ — уменьшаться. Для упрощения можно считать, что изменения токов и напряжений происходят по экспоненциальному закону.

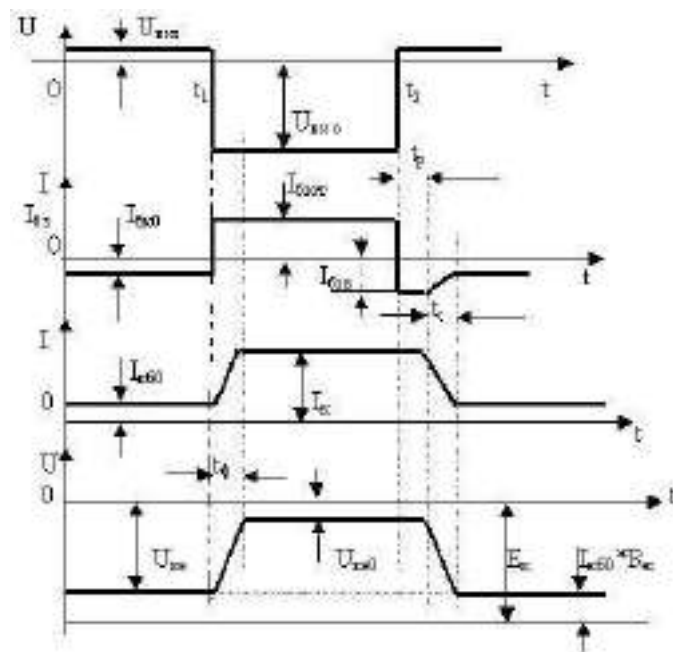


Рис. 10.14. Импульсные диаграммы сигналов транзисторного ключа

Инерционность процессов в области высоких частот можно учесть эквивалентной постоянной времени

$$T_{\text{в}} = T_1 + T_2,$$

где $T_1 = 1/2\pi F_{\text{гр}}$ — постоянная времени, характеризующая процессы в транзисторе, связанные с величиной граничной частоты $F_{\text{гр}}$;

T_2 — постоянная времени, зависящая от величины емкости коллекторного перехода и величины сопротивления коллекторной цепи в схеме ОЭ.

С некоторыми допущениями, полагая, что коллекторный ток возрастает по экспоненциальному закону, можно оценить длительность фронта импульса коллекторного тока:

$$t_{\phi} = T_{\text{в}} \ln[S / (S - 1)], \quad (10.16)$$

где $S = I_{\text{бзот}}/I_{\text{бз гр}}$ – коэффициент насыщения транзистора.

Из уравнения следует вывод, что длительность фронта импульса уменьшается с увеличением коэффициента насыщения. Происходит это потому, что в случае увеличения коэффициента S увеличивается базовый ток, заставляющий быстрее изменяться коллекторный ток. При $S = 1$ (это активный режим на грани насыщения) значение t_{ϕ} следует определять по другому выражению, определяя его относительно уровней 0,1 и 0,9 установившегося значения коллекторного тока: $t_{\phi} = T_{\text{в}} \ln(0,9/0,1) = 2,2 T_{\text{в}}$.

Процесс запираания транзистора начинается в момент t_2 , когда $U_{\text{вхо}}$ меняет знак. Однако ток коллектора и напряжение на открытом транзисторе некоторое время остаются неизменными, т.е. создается задержка в запираании транзистора. Происходит это из-за того, что необходимо какое-то время t_p ухода избыточных носителей заряда из базы (время рассасывания заряда). Рассасывание происходит по цепи коллектора (за счет ухода избыточных зарядов) и по цепи базы (за счет протекания обратного тока $I_{\text{бз0}}$, вызванного запирающим напряжением). Величина этого тока ограничивается сопротивлением R_6 входной цепи:

$$I_{\text{бз0}} = U_{\text{вхз}} / R_6.$$

Время, в течение которого происходит рассасывание избыточного заряда в базе, называется временем рассасывания t_p . Это время зависит от коэффициента насыщения S . Приблизительно его можно оценить по выражению $t_p = T_{\text{в}}/2 \cdot \ln S$. За ним следует интервал времени спада тока коллектора t_c (время заднего фронта, время среза):

$$t_c = T_{\text{в}} \ln[1 + (I_{\text{бз гр}} / I_{\text{бзв}})],$$

где $I_{\text{бзв}}$ – амплитуда импульса тока базы в момент переключения (рис. 10.14).

Длительности t_{ϕ} , t_p , t_c характеризуют быстродействие транзисторного ключа. Приведенные оценочные выражения показывают, что эти величины зависят от частотных свойств транзистора и параметров импульса базового тока. Порядок их величин составляет от долей единицы до единиц микросекунд.

Одним из способов повышения быстродействия транзисторных ключей является способ применения ненасыщенных ключей, в которых транзистор работает на границе активной области, например, ключ с транзистором Шоттки. Структурная схема такого ключа приведена на рис. 10.15, где обозначено: $VD_{Ш}$ – диод Шоттки, $VT_{Ш}$ – транзистор Шоттки.

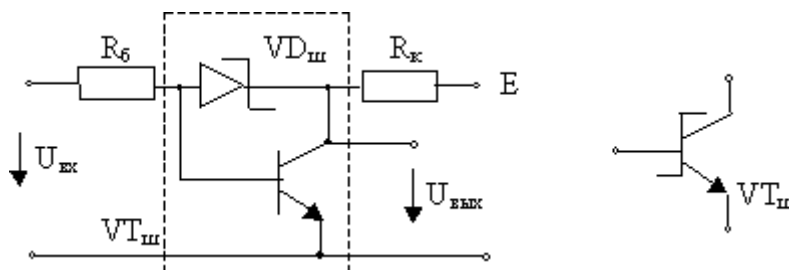


Рис. 10.15. Ключ с диодом Шоттки и УГО транзистора Шоттки

Особенность действия ключа состоит в следующем. До момента открывания диода процесс идет как обычно. В процессе открытия транзистора диод закрыт до момента, при котором вследствие уменьшения коллекторного напряжения напряжение на диоде не достигнет порогового значения. С момента открытия диода ток управления ключом замыкается на коллектор, что приводит к уменьшению тока базы в $(1 + h_{21})$ раз. В итоге избыточный заряд в базе станет намного меньше, чем в обычной схеме насыщенного ключа. Диоды Шоттки имеют малое собственное время восстановления (0,1 нс), низкое напряжение отпираия (0,25 В) и малое сопротивление в открытом состоянии (около 10 Ом).

Реальные ключи на биполярных транзисторах для обеспечения четкой работы в своем составе имеют обычно не менее двух транзисторов. Примеры схем таких ключей представлены на рис. 10.16.

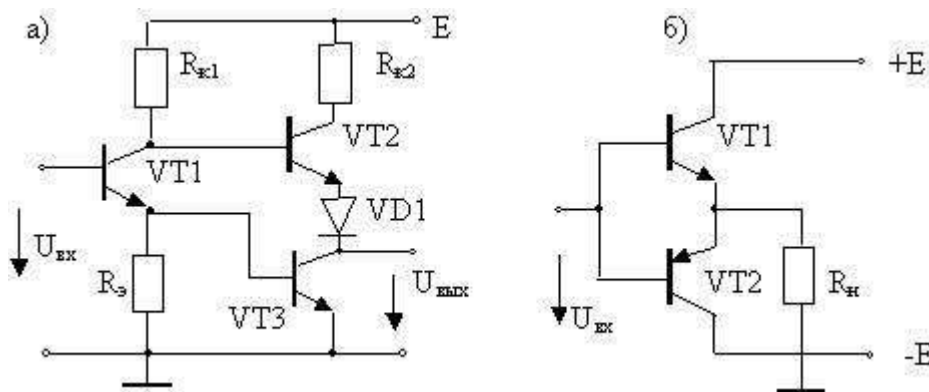


Рис. 10.16. Схемы ключей на биполярных транзисторах:

- а – с управлением однополярным входным импульсом;
- б – с управлением двухполярным входным импульсом

Ключевая схема, изображенная на рис. 10.16, *а*, служит простейшим выходным каскадом цифровых (логических) элементов на биполярных транзисторах (элементы серии ТТЛ).

В схеме ключа рис. 10.16, *а* при уровне входного сигнала $U_{вх} \leq U_{оп}$ на выходе устанавливается выходной сигнал $U_{1п} \leq U_{вых} < E$, где $U_{оп}$, $U_{1п}$ – пороговые значения соответственно низкого и высокого уровней входного сигнала. Транзисторы VT1, VT3 находятся в режиме отсечки, транзистор VT2 – в проводящем состоянии. При подаче на вход схемы $U_{вх} > U_{1п}$, транзистор VT1 открывается, транзистор VT3 переходит в режим насыщения, транзистор VT2 закрывается, на выходе устанавливается «нулевой» уровень выходного напряжения $U_{вых} \leq U_{оп}$. Диод VD1 в схеме рис. 10.16, *а* служит для обеспечения чёткого переключения транзистора VT2. Схема, изображенная на рис. 10.16, *б*, часто используется как выходной каскад в операционных усилителях.

Ключи на полевых транзисторах (ПТ). Ключи на полевых транзисторах имеют широкое применение в качестве коммутаторов аналоговых сигналов (для этого используются ПТ с управляющим $p - n$ -переходом или МОП-транзисторы с индуцированным каналом), а также для коммутации цифровых сигналов (только МОП транзисторы с индуцированным каналом). Примеры ключевых схем на полевых транзисторах разного типа представлены на рис. 10.17.

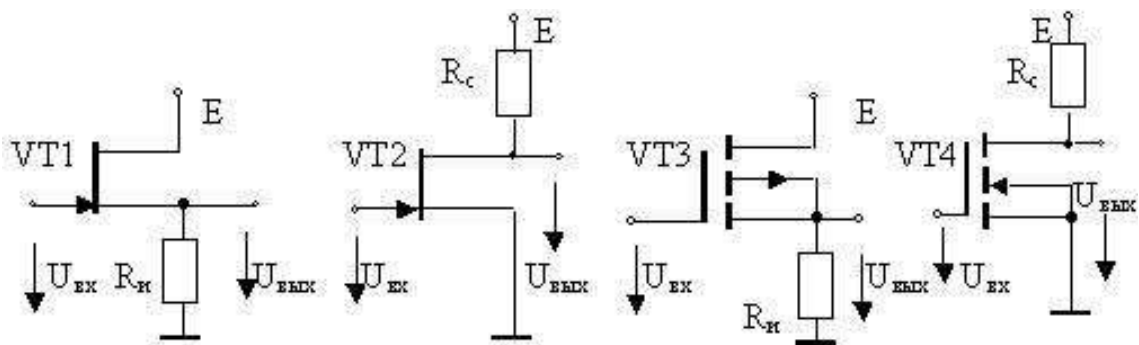


Рис. 10.17. Схемы ключей на полевых транзисторах

Основные достоинства ключей:

- малое остаточное напряжение в проводящем состоянии;
- высокое сопротивление в непроводящем состоянии;
- малая мощность управления; возможность коммутации электрических сигналов очень малого уровня.

Недостаток – сравнительно низкое быстродействие (по сравнению с ключами на биполярных транзисторах).

Для запираания ключей, выполненных на ПТ с управляющим p – n -переходом, к затвору следует приложить запирающее напряжение $U_{\text{зап}}$, по модулю большее напряжения отсечки, но меньшее допустимых для переходов затвор – исток, затвор – сток:

$$U_{\text{зап}} \geq [U_{\text{зи отс}} + (1 \div 3) \text{ В}]; U_{\text{зап}} \leq (U_{\text{зс доп}}, U_{\text{зи доп}}).$$

МОП-транзисторы с индуцированным каналом закрыты до тех пор, пока $U_{\text{зи}}$ и $U_{\text{зс}}$ меньше эффективного порогового напряжения: $(U_{\text{зи}}, U_{\text{зс}}) < U_{\text{зи пор}}$.

Входное сопротивление (по цепи затвора) ключей на ПТ при малой частоте коммутации составляет $10^8 - 10^9$ Ом у ПТ с управляющим p – n -переходом, $10^{12} - 10^{14}$ Ом – у МОП-транзисторов. На высоких частотах сказываются емкости между стоком, истоком и затвором $C_{\text{зс}}$, $C_{\text{зи}}$, поэтому сопротивление ключа уменьшается. У МОП-транзисторов подложку обычно подключают к источнику питания требуемой полярности [подложку « n » – к $(+E)$, подложку « p » – к $(-E)$].

В цифровых устройствах важно иметь стабильные уровни выходных напряжений. Для этого широко применяют ключи на комплементарных транзисторах – КМОП-ключи (рис. 10.18). Комплементарные транзисторы – это транзисторы, обладающие идентичными параметрами, но имеющие разный тип проводимости.

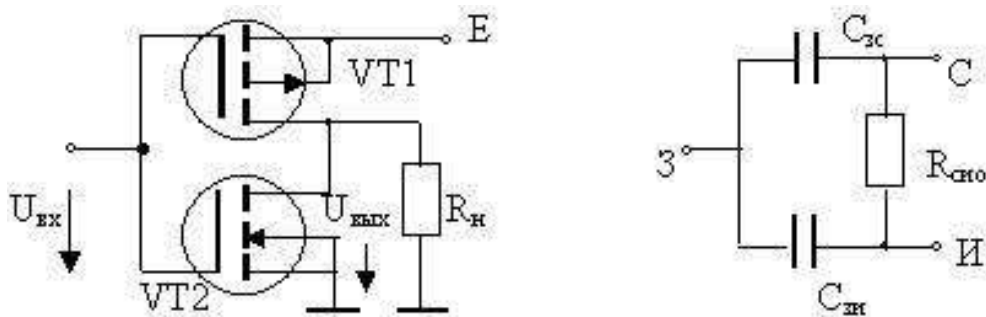


Рис. 10.18. Схема КМОП-ключа и схема замещения открытого МОП-транзистора: $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки; $R_{\text{сно}}$ – сопротивление сток – исток

КМОП-ключ работает следующим образом.

Если подано $(-U_{\text{вх}})$, открыт $VT1$ и резистор $R_{\text{н}}$ подключен к источнику питания. Если подано $(+U_{\text{вх}})$, открыт $VT2$ и вывод выходной цепи подключен к общей шине. При этом ток от источника сигнала не потребляется, т.е. в первом случае на резисторе $R_{\text{н}}$ устанавливается $+E$, во втором – нуль. На основе таких ключей созданы разнообразные микросхемы КМОП серий.

Эквивалентные схемы МОП-транзистора в открытом и закрытом состоянии существенно различаются, так как сопротивление сток – исток в открытом состоянии $R_{\text{сио}}$ на несколько порядков меньше, чем сопротивление $R_{\text{сиз}}$ в закрытом состоянии (рис. 10.19).

Ключи на МОП-транзисторах удобны тем, что могут пропускать ток в обоих направлениях, а цепь управления изолирована от коммутируемой цепи. Сопротивление канала открытого (находящегося в проводящем состоянии) ключа на МОП-транзисторе составляет (10 – 100) Ом, а быстродействие может достигать (3 – 5) нс [2].

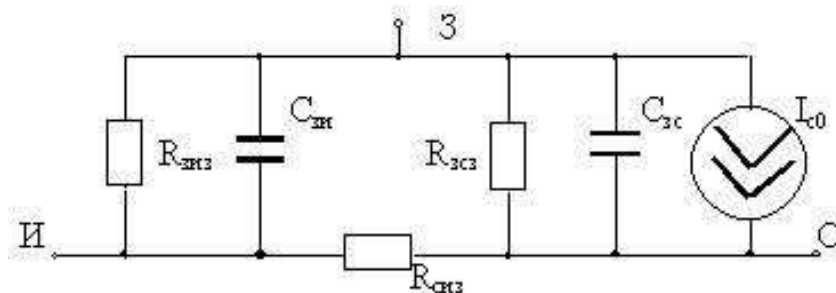


Рис. 10.19. Эквивалентная схема МОП-транзистора в закрытом состоянии

Чаще всего для построения ключей в интегральном исполнении используют КМОП-транзисторы. Это даёт возможность получить постоянное по величине сопротивление ключа в открытом состоянии, не зависящее от величины и направления протекающего тока. Интегральное исполнение ключей позволяет в составе микросхемы сформировать элементы, необходимые для выдачи сигналов управления внешними нормированными сигналами логических элементов цифровых схем.

Сопротивление открытого КМОП-ключа существенно зависит от температуры: оно увеличивается на (2 – 5) % на каждые 10 °С. В закрытом состоянии через КМОП-ключ течёт обратный ток закрытого p – n -перехода [(0,1 – 10) нА при комнатной температуре], причём он увеличивается приблизительно в два раза на каждые 10 °С.

Ключи на полевых транзисторах находят широкое применение не только как самостоятельные электронные элементы, но и как составная часть многих сложных электронных узлов. К таким узлам можно отнести аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, запоминающие устройства и многие другие устройства аналоговой и цифровой техники.

10.7. Использование МОП-ключей в электронных устройствах с переключаемыми конденсаторами

Как известно, основными компонентами интегральных схем (ИС) являются резисторы, конденсаторы и транзисторы (биполярные или (и) полевые), выполняющие функции усилительных и ключевых элементов.

В современной электронике наблюдается устойчивая тенденция вытеснения МОП-транзисторами других типов транзисторов практически во всех категориях ИС, кроме некоторых разновидностей прецизионных и высокочастотных аналоговых ИС. Это объясняется следующими основными преимуществами МОП-технологии ИС по сравнению с биполярными технологиями:

- существенно более высокой плотностью упаковки транзисторов на кристалле;
- простотой схемотехники и технологии изготовления МОП-ИС;
- на несколько порядков меньшей потребляемой мощностью при одинаковой функциональной сложности;
- на несколько порядков большим входным импедансом функциональных узлов ИС (что существенно упрощает сопряжение ИС между собой и управление их режимами и параметрами).

Кроме вышеперечисленных, важным преимуществом МОП-технологии ИС является простота реализации конденсаторов, функции которых при этом выполняют емкости затвор – канал МОП-транзисторов.

С другой стороны, при производстве МОП-ИС (как и биполярных) определенную сложность представляет изготовление резисторов в интегральном исполнении, а также обеспечение приемлемой точности изготовления таких резисторов и стабильности их характеристик во времени и при изменении температуры. В частности, типовая погрешность номинала резистора, изготовленного методом ионной имплантации, составляет порядка нескольких десятых процента, а его температурный коэффициент – несколько сотых долей процента на градус, в то время как аналогичные параметры для МОП-конденсатора примерно на порядок меньше [3].

В качестве радикального решения вышеуказанной проблемы было предложено реализовывать функции резисторов в МОП-ИС посредством переключаемых конденсаторов (ПК), состоящих из МОП-конденсаторов, коммутируемых ключами на МОП-транзисторах. ПК

при этом или выступают в качестве цепей прямой имитации резисторов, или (преимущественно в аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователях) служат для косвенной (функциональной) замены резисторов в кодоуправляемых источниках напряжения, а также в интеграторах [3, 10]. При этом для цепей прямой имитации резисторов посредством ПК характерно постоянное переключение конденсаторов в процессе работы, а для ПК, служащих для функциональной замены резисторов – периодическое выполнение некоторого рабочего цикла, состоящего из нескольких тактов коммутации, обычно с восстановлением начальных значений зарядов на конденсаторах перед каждым рабочим циклом.

С точки зрения теории цепей электронные устройства с переключаемыми конденсаторами (ЭУПК) относятся к дискретным системам с непрерывными (аналоговыми) входными сигналами, так как изменение во времени их выходных сигналов носит дискретный характер. Это означает, что информативными являются значения указанных сигналов только в некоторые моменты времени, соответствующие окончанию очередной фазы коммутации. Поэтому рассмотрение и анализ ЭУПК должно осуществляться с учетом дискретного характера их сигналов.

Необходимо также отметить, что корректное функционирование ЭУПК, как и других типов дискретных систем с непрерывными входными сигналами, возможно только при периоде дискретизации (применительно к ЭУПК – длительности фазы коммутации), намного меньшем периода наиболее высокочастотной из спектральных компонент входного сигнала.

Технология ПК позволяет:

- строить аналоговые и аналого-цифровые ИС на основе только МОП-транзисторов (однотипных элементов), выступающих как в качестве усилительных и ключевых элементов, так и конденсаторов (роль которых при этом играет емкость между затвором и каналом МОП-транзисторов) и элементов цепей имитации или функциональной замены резисторов;

- обеспечивать повышенную точность реализации резисторов и стабильность их сопротивления по сравнению с «классическими» методами их изготовления (например, ионной имплантацией), что обусловлено значительно более высокой точностью и стабильностью емкости МОП-конденсаторов и, тем более, периода коммутации ПК

по сравнению с аналогичными параметрами резисторов в интегральном исполнении, изготовленных «классическими» методами [3];

- достаточно просто реализовывать аналоговые устройства с цифровым управлением параметрами (например, фильтры с управляемой частотой среза).

Естественно, технология ПК не свободна от недостатков, основными из которых являются [3, 10]:

- существенные погрешности имитации или функциональной замены резисторов на частотах, превышающих 10 – 20 % частоты коммутации;

- характерный для всех дискретных систем эффект наложения спектров (элайзинга), заключающийся в искажении спектра выходного сигнала ЭУПК при наличии во входном сигнале составляющих с частотами выше половины частоты коммутации;

- наличие на выходе ЭУПК наводок, обусловленных процессами коммутации; частота данных наводок совпадает с частотой коммутации, а амплитуда обычно составляет порядка единиц – десятков милливольт.

Однако ввиду того, что на практике частота коммутации на несколько порядков превышает верхнюю граничную частоту информативного входного и выходного сигнала ЭУПК, влияние перечисленных недостатков на функционирование ЭУПК достаточно легко сводится к минимуму. Эффекты, обусловленные первыми двумя из них, устраняются включением на входе ЭУПК ФНЧ (фильтра низкой частоты) с частотой среза, намного меньшей частоты коммутации, а наводки на выходе ЭУПК – включением на нем аналогичного ФНЧ. Обычно указанные ФНЧ или компоненты для их реализации входят в состав ИС на ПК.

Вышесказанное, в целом, обуславливает весьма широкое применение технологии ПК в современных аналоговых и аналого-цифровых ИС.

Рассмотрим общие принципы реализации ЭУПК, основанных как на прямой имитации, так и на косвенной замене резисторов.

ЭУПК на основе прямой имитации резисторов. Физический принцип прямой имитации резисторов посредством коммутации конденсаторов может быть пояснен на примере ПК, функциональная схема которого представлена на рис. 10.20, а, а временные диаграммы сигналов управления его ключами показаны на рис. 10.20, б. Буквами

e и o обозначены сигналы управления ключами, активные в течение четной и нечетной фаз коммутации, от английских слов «even» – четный и «odd» – нечетный. Длительности четной и нечетной фаз коммутации ПК всегда равны между собой, а управляющие сигналы четной и нечетной фаз взаимно инверсны.

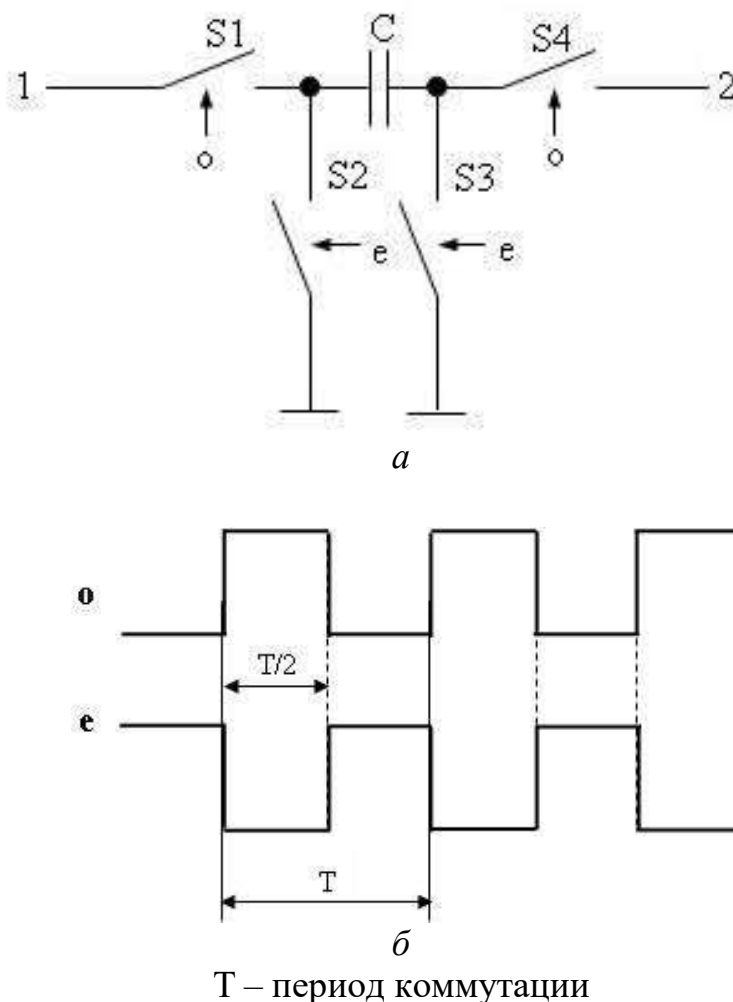


Рис. 10.20. Пример цепи прямой имитации резистора на ПК (а) и временные диаграммы сигналов управления ее ключами (б)

В течение нечетных фаз коммутации, т.е. при замыкании ключей S1 и S4, конденсатор заряжается напряжением, приложенным между точками 1 и 2. При размыкании ключей S1 и S4 и замыкании управляемой в противофазе с ними пары ключей S2 и S3 (в течение четных фаз) конденсатор разряжается. Период циклов его заряда и разряда совпадает с периодом сигналов управления ключами, а длительности данных циклов равны половине периода указанных сигналов.

С физической точки зрения, принцип имитации резистора посредством ПК можно пояснить следующим образом. Как известно, конденсатор проводит электрический ток только в процессе заряда/разряда. Поэтому ПК, функционирующий в режиме периодического заряда с последующим разрядом можно рассматривать как структуру, способную проводить ток любой частоты, в том числе постоянный.

Определим эквивалентное сопротивление между точками 1 и 2 представленного на рис. 10.20, *а*, ПК в простейшем с точки зрения анализа случае – при пренебрежимо малом сопротивлении между каждой из указанных точек и общей шиной. Это имеет место, например, при работе данного ПК в качестве входного резистора интегратора на операционном усилителе (ОУ) [6], при пренебрежимо малом выходном сопротивлении источника входного напряжения интегратора. На рис. 10.21, *а*, и 10.21, *б*, приведены эквивалентные схемы указанного ЭУПК в каждой из двух фаз коммутации. Для упрощения полагаем, что конденсаторы, ключи и ОУ идеальны (в частности, коэффициент усиления и входное сопротивление ОУ бесконечно велики [6]).

Очевидно, эквивалентное сопротивление ПК равно отношению среднего за период коммутации значения напряжения на нем к среднему значению тока через ПК за указанный период. Среднее за период коммутации T напряжение на ПК анализируемого ЭУПК, описывается следующим выражением:

$$\overline{U_{C1}} = \frac{1}{C1} \int_0^T i_{C1}(t) \cdot dt,$$

откуда получаем, что:

$$\overline{U_{C1}} = \frac{\overline{I_{C1}}}{C1} T,$$

где $\overline{I_{C1}}$ – среднее за период коммутации значение тока через ПК.

Следовательно, эквивалентное сопротивление анализируемого ПК равно:

$$R_{\text{Э}} = \frac{\overline{U_{C1}}}{\overline{I_{C1}}} = \frac{T}{C1}.$$

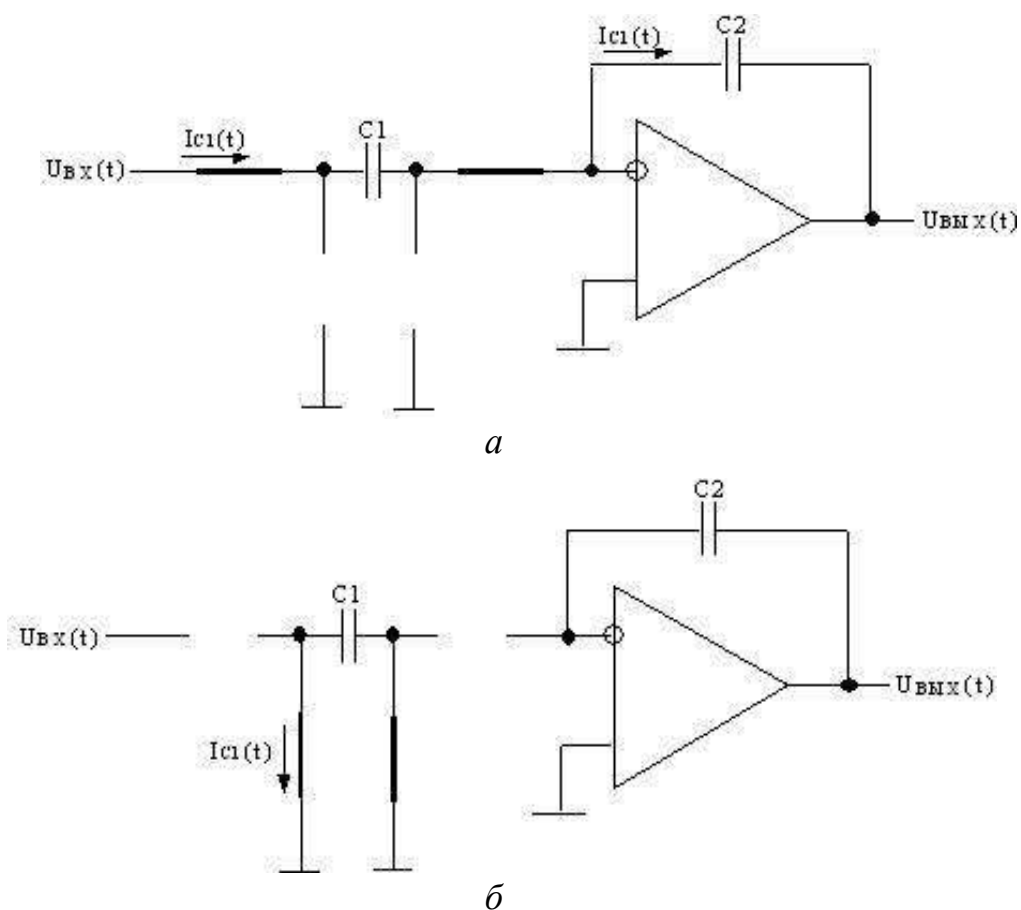


Рис. 10.21. Эквивалентные схемы интегратора на ПК в нечетных (а) и четных (б) фазах коммутации

На частотах, много меньших частоты коммутации, падение напряжения на ПК и ток через него можно приближенно считать постоянными в течение периода коммутации. Поэтому в данном частотном диапазоне верно соотношение:

$$\frac{u_{C1}(t)}{i_{C1}(t)} \approx \frac{T}{C1}.$$

Таким образом, на частотах, много меньших частоты коммутации, данный ПК эквивалентен резистору с сопротивлением, прямо пропорциональным периоду коммутации и обратно пропорциональным емкости ПК.

Естественно, кроме рассмотренной выше цепи имитации резистора на ПК, известно достаточно много вариантов реализации подобных цепей.

В общем случае, на частотах, намного меньших частоты коммутации, эквивалентный импеданс цепи прямой имитации резистора на базе ПК равен kT/C , где k – коэффициент, зависящий от конкретной конфигурации ПК, а также от соотношения между емкостью ПК и выходной емкостью источника сигнала, с одной стороны, и емкостью нагрузки – с другой [10]. Необходимо также отметить, что корректное функционирование указанных цепей возможно только при емкостном характере как выходного импеданса источника сигнала, так и нагрузки [3, 10].

ЭУПК на основе косвенной замены резисторов. В ЭУПК указанного класса ПК служат преимущественно в качестве элементов кодоуправляемых источников напряжения [3, 10]. Принцип действия таких источников основан на задании их выходных напряжений путем комбинирования и перераспределения зарядов (напряжений) на коммутируемых конденсаторах, входящих в состав указанных источников.

Базовыми положениями при анализе указанных ЭУПК являются следующие [3, 10]:

– *в установившемся режиме* заряд конденсатора Q_C и приложенное к нему напряжение U_C связаны соотношением:

$$Q_C = U_C \times C, \quad (10.17)$$

общий заряд n параллельно соединенных конденсаторов равен сумме их зарядов:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_{Ci}, \quad (10.18)$$

а при последовательном соединении n конденсаторов их заряды равны между собой:

$$Q_{C1} = Q_{C2} = \dots = Q_{Cn}; \quad (10.19)$$

– *при коммутации* напряжение на конденсаторе не может изменяться скачкообразно.

Основными разновидностями ЭУПК на основе косвенной замены резисторов являются *цифро-аналоговые* и *аналого-цифровые преобразователи* (ЦАП и АЦП) на ПК.

Подробное изложение вопросов реализации и анализа ЭУПК на основе косвенной замены резисторов представлено в [3] и [10].

МОДУЛЬ 3. ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ СХЕМОТЕХНИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

11. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЛОГИЧЕСКИХ (ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬНЫХ) ФУНКЦИЙ

11.1. Логические функции и элементы

В подавляющем большинстве ЭВМ и цифровых устройств обрабатываемая информация представлена в виде двоичных чисел. Переменные величины и функции от них, которые могут принимать только два значения 1 и 0, называются логическими переменными и логическими (переключаемыми) функциями. Свойства логических функций изучает алгебра логики, а реализация логических функций осуществляется функциональными устройствами, называемыми логическими элементами.

Значениям переменных 1 и 0 ставятся в соответствие символы двоичного алфавита 1 и 0, а также физические аналоги – два хорошо различимых значения напряжения, тока, электрического сопротивления, магнитной индукции. Величина и полярность уровней (например, напряжения), которым ставятся в соответствие символы 0 и 1, выбираются из соображений удобства технической реализации и заданной помехоустойчивости.

В основе цифровой техники лежит использование логических или переключаемых схем. Различают два класса логических схем [16]:

1. Комбинационные схемы, в которых значение выходной переменной зависит только от значений входных переменных в данный момент времени.

2. Последовательностные схемы, в которых значение выходной переменной зависит не только от значений входных переменных в данный момент, но и от состояний элементов памяти, заданных в предыдущих тактах работы.

Функционирование любого, сколь угодно сложного цифрового устройства можно описать двояким образом: аналитически или

с помощью таблиц. Распространены комбинационные схемы, имеющие m логических входов и n логических выходов (рис. 11.1).

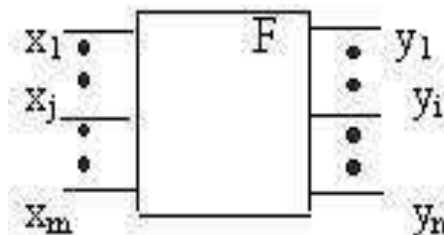


Рис. 11.1. Блок-схема цифрового устройства

Если $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_m$ – информационные значения независимых входных (управляющих) сигналов, а $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n$ – информационные значения выходных сигналов, то комбинационная схема может быть описана системой уравнений:

$$\|Y_i = F(X_i)\|. \quad (11.1)$$

Функцию Y_i называют логической (булевой или переключательной). При наличии m независимых входных переменных, каждая из которых может принимать два значения (1 или 0), максимальное число возможных наборов из этих переменных будет $A = 2^m$, а максимально возможное число значений функций определится соотношением $N_m = 2^A$.

Можно задать систему уравнений (11.1) в виде таблиц, называемых *таблицами истинности*. Таблицы и аналитические выражения используются для анализа и синтеза устройств с наименьшим количеством элементов [16].

В алгебре логики основными считаются такие функции (операции), при помощи которых можно записать любую сложную логическую функцию и распространить их действие на любое количество переменных. Такими основными функциями являются следующие три:

- 1) *инверсия* (отрицание) – операция НЕ;
- 2) *конъюнкция* (логическое умножение) – операция И;
- 3) *дизъюнкция* (логическое сложение) – операция ИЛИ.

Сущность логической операции инвертирования состоит в отрицании первичного высказывания. С помощью логической операции НЕ можно переводить прямой код в обратный и наоборот. Обратным кодом при положительном кодировании называется такой, в котором истинному логическому высказыванию соот-

ветствует нулевой сигнал (цифра 0), а ложному – единичный сигнал (цифра 1). В математической логике высказывания оцениваются двумя критериями: оно может быть «истинным» или «ложным». Этому можно поставить в соответствие цифры 1 и 0, либо сигналы, условно соответствующие этим цифрам. Аналитически операция НЕ записывается в виде $y = \bar{x}$ (читается «игрек равен не икс»). Табличное представление этой функции (таблица истинности) и условное графическое обозначение (УГО) элемента (инвертора), реализующего эту функцию, показаны на рис. 11.2.

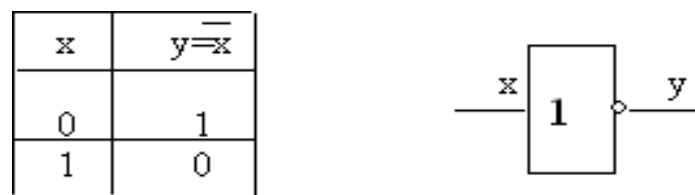


Рис. 11.2. Таблица истинности и УГО инвертора

Конъюнкция – операция И или логическое произведение, является сложным высказыванием, истинным только в единственном случае, когда истинны все элементарные высказывания. Аналитически эта операция записывается следующим образом:

$$y = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_m. \quad (11.2)$$

Принятая форма записи наглядно показывает, что функция «у» обращается в нуль, если хотя бы один из аргументов принимает нулевое значение. Таблицы истинности и условные обозначения некоторых конъюнкторов показаны на рис. 11.3.

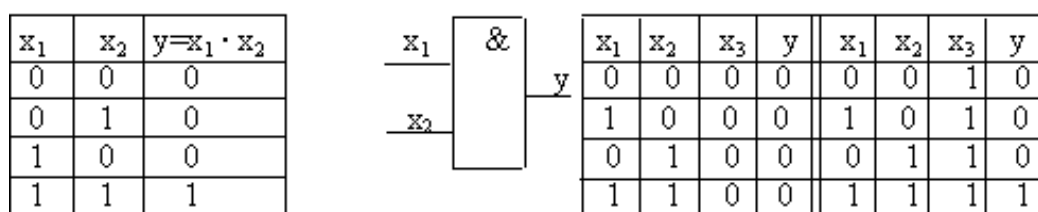


Рис. 11.3. Таблицы истинности для конъюнкторов с двумя и тремя аргументами и УГО двухвходового конъюнктора

Дизъюнкция – логическая сумма (операция ИЛИ) является сложным высказыванием, истинным, если истинно не менее чем одно элементарное высказывание. Аналитическое выражение этой операции имеет вид:

$$y = x_1 + x_2 + \dots + x_n. \quad (11.3)$$

Графическое изображение двухвходового дизъюнктора и его таблица истинности показаны на рис. 11.4.

x_1	x_2	$y = x_1 + x_2$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

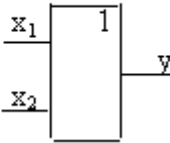


Рис. 11.4. Таблица истинности и УГО двухвходового элемента ИЛИ

Логические функции конъюнкции и дизъюнкции обладают свойством *двойственности*, которое заключается в том, что одна и та же функция в зависимости от способа кодирования уровней сигналов значениями 0 и 1 может выполнять функции либо И, либо ИЛИ. Сравнивая таблицы истинности этих функций, можно заметить, что таблица истинности для элемента И соответствует операции И для положительной логики (когда высокий уровень – «истинно» соответствует 1, а низкий – «ложно» соответствует 0). С другой стороны, эта же таблица выражает операцию ИЛИ для негативной логики (когда в качестве высокого уровня – «истинно» принят 0, а в качестве низкого уровня «ложно» принята 1). Чаще всего используется положительная логика, поэтому в дальнейшем рассматриваются функции для неё.

Для лучшего усвоения понятий конъюнкции, дизъюнкции и свойства двойственности на рис. 11.5 показаны электромеханические эквиваленты операций И и ИЛИ. Если за 1 принять наличие напряжения на резисторе, а за 0 – отсутствие напряжения (положительное кодирование), то схема на рис. 11.5, а реализует операцию ИЛИ, а схема на рис. 11.5, б – операцию И. Если за единицу принять отсутствие напряжения на резисторе, а за 0 – наличие напряжения (отрицательное кодирование), то схема на рис. 11.5, а реализует операцию И, а схема на рис. 11.5, б – операцию ИЛИ. Соответственно можно условиться, что при положительном кодировании разомкнутое положение ключа соответствует логическому нулю, а замкнутое положение – логической единице, и наоборот – при отрицательном кодировании.

Алгебра логики допускает возможность образования сложных функций, т.е. функций, аргументы которых являются функциями других двоичных аргументов. Например, если $Y = y(z_1, z_2)$,

а $z_1 = f_1(x_1, x_2)$ и $z_2 = f_2(x_3, x_4)$, то очевидно, что $Y = y(x_1, x_2, x_3, x_4)$. Такая операция замены аргументов одной функции другими функциями называется *суперпозицией* функций. Эта операция дает возможность с помощью функций меньшего числа аргументов получать функции большего их числа. Набор двоичных функций, который обеспечивает представление любой другой функции посредством суперпозиции функций этого набора, называют функционально полным.

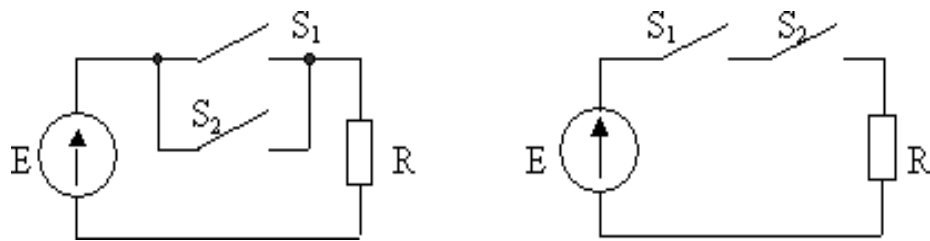


Рис. 11.5. Электромеханические эквиваленты операций ИЛИ и И

Например, из функций двух переменных можно составить значительное число различных функционально полных наборов. Так функционально полные наборы образуют функции инверсии и конъюнкции, инверсии и дизъюнкции. Сочетания этих функций широко используются при синтезе электронных устройств.

Инверсия логической суммы двух величин (элемент ИЛИ-НЕ) носит название *стрелка Пирса*, её аналитическое представление имеет вид:

$$y = \overline{x_1 + x_2} \text{ или } y = x_1 \downarrow x_2. \quad (11.4)$$

Инверсия логического произведения двух величин (элемент И-НЕ) носит название *штрих Шеффера*, его аналитическое представление показано ниже:

$$y = x_1 \cdot x_2 \text{ или } y = x_1 / x_2. \quad (11.5)$$

Набор функций дизъюнкции, конъюнкции и инверсии, рассмотренных выше, получил название основного функционально полного набора.

11.2. Аксиомы, законы, тождества и теоремы алгебры логики (булевой алгебры)

В алгебре логики любая переменная может иметь состояние «0» или «1», поэтому каждой двоичной переменной, например X , ставят-

ся в соответствие обратная или дополнительная к ней (инверсная) переменная, такая, что:

$$\text{если } X = 0, \text{ то } \bar{X} = 1; \text{ если } X = 1, \text{ то } \bar{X} = 0.$$

Правила (законы), характеризующие операции дизъюнкцию (логическое сложение), конъюнкцию (логическое умножение), инверсию (логическое отрицание) приведены в табл. 11.1.

Для алгебры логики, как и для обыкновенной алгебры, действительны следующие законы:

- закон коммутативности (переместительный закон) для логического сложения и умножения: $x + y = y + x$; $x \cdot y = y \cdot x$;
- закон ассоциативности (сочетательный закон) для логического сложения и умножения: $x + y + z = (x + y) + z = x + (y + z)$;
- закон дистрибутивности логического умножения по отношению к сложению (распределительный закон):

$$x(y + z) = xy + xz.$$

Следует предостеречь, что в булевой алгебре не действуют правила вычитания и деления обычной алгебры. Величины в алгебре логики не могут делиться, а потому в ней нельзя сокращать общий множитель. В булевой алгебре имеются специфические операции, отсутствующие в обычной алгебре, например, «склеивание», «поглощение».

1. Операция склеивания (правило склеивания): $xy + x\bar{y} = x$;
 $(x + y) \cdot (x + \bar{y}) = x$.

Второе выражение является двойственным первому. В алгебре Буля двойственные выражения получаются путем одновременной замены операций ИЛИ операциями И и наоборот – операций И на операции ИЛИ, а также заменой всех логических нулей единицами и всех единиц нулями.

2. Операция поглощения: $x + xy = x$; $x(x + y) = x$.

3. Операция (функция) неравнозначности (ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, обозначается знаками « $\oplus$ », « ∇ » или « $\vee$ »): $\bar{x}y + x\bar{y} = x \oplus y$.

Логическая функция, называемая ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, в отличие от операции ИЛИ (« x или y , или x и y оба вместе») означает: «только x или только y ». Таблица истинности для двух функций показана на рис. 11.6.

В двоичной системе операция ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ аналогична (по виду таблицы) результату арифметического сложения двух бинарных чисел, поэтому называется «суммой по модулю 2» или полусуммой.

A	B	$S = A \oplus B$	A+B
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	0	1

а)

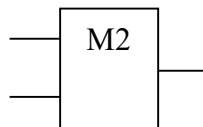
б)

Рис. 11.6. Таблица истинности для функций двух переменных ИЛИ и ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ и условные графические изображения логических элементов:
a – элемент ИЛИ, *б* – элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

Аксиомы для логической функции ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ имеют вид:

$$x \oplus 0 = x; x \oplus x = 0; x \oplus \bar{1} = x; \bar{x} \oplus x = 1.$$

В литературе часто используется ещё одно условное изображение элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ:



Перечень основных законов и тождеств алгебры Буля приведен в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Законы булевой алгебры

№	Название	Форма записи	
		<i>a</i>	<i>б</i>
1	Закон нулевого множества	$x + 0 = x$	$x \cdot 0 = 0$
2	Законы универсального множества (сложения с единицей и умножения на 1)	$x + 1 = 1$	$x \cdot 1 = x$
3	Законы инверсии (теоремы де Моргана). Инверсия суммы есть произведение слагаемых, инверсия произведения есть сумма инверсий сомножителей	$\overline{x_1 + x_2} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 ;$ $\overline{x_1 \cdot x_2} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$	$\overline{\overline{x_1 + x_2}} = \overline{\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2} ;$ $\overline{\overline{x_1 \cdot x_2}} = \overline{\bar{x}_1 + \bar{x}_2}$
4	Закон двойного отрицания	$\overline{\bar{x}} = x$	

Окончание табл. 11.1

№	Название	Форма записи	
		<i>a</i>	<i>b</i>
5	Закон тождества (повторения, тавтологии)	$x + x = x$	$x \cdot x = x$
6	Закон исключённого третьего (противоречия, дополнительности, правило отрицания)	$x + \bar{x} = 1$	$x \cdot \bar{x} = 0$
7	Закон коммутативности (переместительный)	$x_1 + x_2 = x_2 + x_1$	$x_1 \cdot x_2 = x_2 \cdot x_1$
8	Ассоциативный закон (сочетательный)	$x_1 + (x_2 + x_3) = (x_1 + x_2) + x_3 = x_1 + x_2 + x_3$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = (x_1 \cdot x_2) \cdot x_3 = x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3)$
9	Дистрибутивный закон (распределительный)	$x_1 \cdot (x_2 + x_3) = x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3;$ $(x_1 + x_2) \cdot (x_1 + x_3) = x_1 + x_2 \cdot x_3$	
10	Закон обращения	Если $\overline{x_1} = \overline{x_2}$, то $x_1 = x_2$	
11	Закон поглощения (абсорбции)	$x_1 + x_1 \cdot x_2 = x_1$	$x_1 \cdot (x_1 + x_2) = x_1$
12	Закон склеивания	$\overline{(x_1 + x_2)} \cdot (x_2 + x_1) = x_2$	$\overline{x_1 \cdot x_2} + x_1 \cdot x_2 = x_1$

Законы 5, 7, 8, 9, 11, 12 называют комбинационными законами [32].

11.3. Представление и преобразование логических функций

Логическая функция может быть записана аналитически различными сочетаниями логических операций. Однако с точки зрения представления логических функций и последующего синтеза логической схемы наиболее удобны формы записи, при которых функция выражается либо в виде суммы произведений переменных, либо в виде произведения их сумм.

Первая запись (сумма произведений переменных) называется дизъюнктивной нормальной формой (ДНФ). Например:

$$F = x_1 + \bar{x}_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 + \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3.$$

Вторая форма (произведение сумм переменных) называется конъюнктивной нормальной формой (КНФ). Например:

$$F_1 = x_1 \cdot (x_1 + x_2) \cdot (x_2 + x_3) \cdot (\bar{x}_1 + x_2 + x_3).$$

При этом инверсия любой функции, записанной в ДНФ, дает запись в КНФ и наоборот. Например:

$$F = x_1 + x_2 \cdot \bar{x}_3 + x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3;$$

$$\bar{F} = \bar{x}_1 \cdot (\bar{x}_2 + x_3) \cdot (\bar{x}_1 + x_2 + \bar{x}_3).$$

Это доказывается с помощью *теоремы Шеннона*, обобщившего законы де Моргана. Теорема утверждает, что инверсия любой функции получается заменой каждой переменной ее инверсией и одновременно взаимной заменой символов сложения (дизъюнкции) и умножения (конъюнкции).

При применении правила следует строго придерживаться группировки членов. Например: $F = x_1 \cdot \bar{x}_2 + \bar{x}_1 \cdot x_2 = x_1 \oplus x_2$ – функция неравнозначности.

Определение инверсии по теореме Шеннона даёт функцию равнозначности: $\bar{F} = (\bar{x}_1 + x_2) \cdot (x_1 + \bar{x}_2) = x_1 \cdot x_2 + \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$.

Логическую функцию, заданную любым аналитическим выражением, можно преобразовать к ДНФ и КНФ, пользуясь правилами алгебры логики, при этом может существовать несколько равносильных ДНФ и КНФ. Оказалось, что имеется только один вид ДНФ и КНФ, в которых функция может быть записана единственным образом: это так называемые *совершенные нормальные формы* – СДНФ и СКНФ.

В СДНФ каждое входящее слагаемое включает все переменные (они могут быть с инверсиями или без них) и нет одинаковых слагаемых. В СКНФ каждый сомножитель включает все переменные (они могут быть с инверсиями или без них) и нет одинаковых сомножителей.

Логическая функция наиболее наглядно и полно представляется так называемой таблицей соответствия или истинности, в которой для каждой комбинации значений переменных указывается значение функции. По сути это алгоритм работы синтезируемой цифровой системы. От табличной формы представления функции можно перейти к её аналитической записи в виде СДНФ или СКНФ. Например, функция $F(x_1, x_2, x_3)$ задана табличными значениями (табл. 11.2). Требуется записать её в виде СДНФ и СКНФ.

Анализ табл. 11.2 показывает, что для комбинаций 2, 7, 8, где $F = 1$, справедливы логические произведения: $\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 = 1$; $x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 = 1$; $x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 = 1$.

Комбинации, при которых функция истинна ($F = 1$), называют конституентами единицы или минтермами (конституировать – устанавливать, определять состав, содержание). Представление логической функции в виде логической суммы минтермов определяет ее СДНФ: $F = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 + x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$.

Таблица 11.2

Таблица истинности функции F

x_1	x_2	x_3	F	№ комбинации
0	0	0	0	1
0	0	1	1	2
0	1	0	0	3
0	1	1	0	4
1	0	0	0	5
1	0	1	0	6
1	1	0	1	7
1	1	1	1	8

Функцию можно представить не только ее единичными, но и нулевыми значениями, как инверсиями единицы. Из таблицы видно, что $F = 0$ или $\overline{F} = 1$, если $\overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} = 1$; $\overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 = 1$; $\overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} = 1$; $x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} = 1$; $x_1 \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} = 1$.

Тогда функцию $\overline{F}$ можно представить в виде логической суммы:
 $\overline{F} = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} + x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} + x_1 \cdot x_2 \cdot \overline{x_3}$.

Используя теорему Шеннона, получим произведение сумм переменных, для чего ещё раз инвертируем инверсию функции F :

$$\overline{\overline{F}} = F = (x_1 + x_2 + x_3) \cdot (\overline{x_1} + \overline{x_2} + \overline{x_3}) \cdot (\overline{x_1} + x_2 + \overline{x_3}) \cdot (\overline{x_1} + \overline{x_2} + x_3) \cdot (\overline{x_1} + x_3 + \overline{x_2}).$$

Каждый сомножитель в полученном выражении состоит из суммы тех переменных, для которых функция обращается в нуль в соответствии с таблицей истинности. Такие суммы называют конституентами нуля или макстермами. Произведение макстермов определяет СКНФ функции F .

11.4. Понятие о минимизации логических функций

Минимизация функции – это упрощение формы её записи с целью реализации с наименьшим числом элементов. Алгебра логи-

ки располагает приёмами, разработанными на основе её законов, позволяющими производить минимизацию достаточно просто. Если число переменных не превышает четырёх, удобен метод карт Карно. Карта Карно представляет собой графическое изображение значений всех возможных комбинаций переменных – это по сути наглядное представление всех минтермов заданного числа переменных, размещенных в клетках карты определенным образом. Для представления способов размещения минтермов изобразим карты Карно для двух, трёх и четырёх переменных и запишем в клетки соответствующие минтермы.

В карте минтермы расположены так, что минтермы соседних клеток отличаются значением только одной переменной. При этом соседними считаются также крайние клетки столбца или строки. Прямое значение переменной обозначается символом 1, инверсное – символом 0. Порядок чередования значений переменных в строках и столбцах: 00, 01, 11, 10 (как показано на рис. 11.7).

		$\overline{x}$	
		0	1
y	0	$\overline{x}\overline{y}$	$x\overline{y}$
	1	$\overline{x}y$	xy

		xy			
		00	01	11	10
z	0	$\overline{z}\overline{x}\overline{y}$	$\overline{z}\overline{x}y$	$\overline{z}x\overline{y}$	$\overline{z}xy$
	1	$z\overline{x}\overline{y}$	$z\overline{x}y$	$zx\overline{y}$	zxy

		xy			
		00	01	11	10
zv	00	$\overline{z}\overline{v}\overline{x}\overline{y}$	$\overline{z}\overline{v}\overline{x}y$	$\overline{z}\overline{v}x\overline{y}$	$\overline{z}\overline{v}xy$
	01	$\overline{z}\overline{v}\overline{x}\overline{y}$	$\overline{z}\overline{v}\overline{x}y$	$\overline{z}\overline{v}x\overline{y}$	$\overline{z}\overline{v}xy$
	11	$z\overline{v}\overline{x}\overline{y}$	$z\overline{v}\overline{x}y$	$z\overline{v}x\overline{y}$	$z\overline{v}xy$
	10	$z\overline{v}\overline{x}\overline{y}$	$z\overline{v}\overline{x}y$	$z\overline{v}x\overline{y}$	$z\overline{v}xy$

Рис. 11.7. Карты Карно для двух (x, y), трёх (z, x, y) и четырёх (z, v, x, y) переменных

Минтермы минимизируемой функции отмечают единицами в соответствующих клетках карты. Минтермы, не входящие в функцию, отмечают в клетках нулями или пустыми клетками. На основании дистрибутивного (распределительного) закона: $(x + y) \times$

$\times \cdot (x + z) = x + yz$, а также логических соотношений $x + 0 = x$, $x + 1 = 1$, $x + \bar{x} = 1$, $x \cdot \bar{x} = 0$ можно доказать, что группа из двух минтермов, находящихся в соседних клетках, может быть заменена одним логическим произведением, содержащим на одну переменную меньше. Если соседними являются две пары минтермов, то такая группа из четырех минтермов может быть заменена произведением, содержащим уже на две переменные меньше и т.д. В общем случае наличие 2^n соседних минтермов позволяет заменить их произведениями, содержащими на n ($n = 1, 2, 3$) переменных меньше. В этом и состоит суть метода минимизации с применением карт Карно (карты Карно часто называют диаграммами Вейча) [46].

Рассмотрим процесс минимизации на примере функции четырёх переменных x, y, z, v , заданной следующим логическим выражением:
 $F = yvz + \bar{x}yv + \bar{y}\bar{v}z + \bar{x}y\bar{z}$.

Для представления функции F в виде логической суммы минтермов преобразуем её следующим образом: каждое слагаемое умножим на единичное значение, образованное логической суммой прямого и инверсного значения той переменной, которой недостаёт для полного набора в каждом слагаемом.

$$\begin{aligned}\bar{F} &= yvz(\bar{x} + x) + \bar{x}yv(z + \bar{z}) + \bar{y}\bar{v}z(x + \bar{x}) + \bar{x}y\bar{z}(v + \bar{v}) = \\ &= \bar{x}yvz + x y v z + \bar{x} y v \bar{z} + \bar{x} y v z + x \bar{y} \bar{v} z + \bar{x} \bar{y} \bar{v} z + \bar{x} y v \bar{z} + \bar{x} y v \bar{z}.\end{aligned}$$

Заменяя группы повторяющихся выражений одним соответствующим выражением, получим функцию в виде СДНФ:

$$F = x y v z + \bar{x} y v z + x \bar{y} \bar{v} z + \bar{x} y v \bar{z} + x y \bar{v} \bar{z} + \bar{x} \bar{y} v \bar{z}.$$

Анализ показывает, что функция четырёх переменных получена в виде суммы шести минтермов (в каждом слагаемом содержатся все переменные и нет одинаковых слагаемых). Для осуществления минимизации следует использовать карту Карно для четырёх переменных. Таким образом, в карте Карно из шестнадцати клеток функцию будут представлять минтермы, размещённые в шести клетках. Обозначая места размещения минтермов в клетках единицами, заполняем карту, как показано на рис. 11.8.

Выделяем группы соседних минтермов, учитывая, что крайние клетки столбцов и строк являются тоже соседними. На карте выделенные группы отмечены пунктирными контурами и цифрами мелкого шрифта. Первая группа: $\bar{x} y v \bar{z} + \bar{x} y v z = \bar{x} y z$. Вторая группа: $x y v z + \bar{x} y v z = y v z$. Третья группа: $\bar{x} \bar{y} \bar{v} z + x \bar{y} \bar{v} z = \bar{y} \bar{v} z$.

Итак, минимизированная функция, выраженная в ДНФ, будет иметь вид:

$$F = \bar{x}y\bar{z} + yvz + \bar{y}\bar{v}z .$$

	00	01	11	10
00		1		
01	1			1
11		1	1	
10		1		

Рис. 11.8. Карта Карно для минимизируемой функции

Непосредственная реализация функции по полученному выражению требует использования четырёх инверторов, двух логических элементов ИЛИ, трёх логических элементов И с тремя входами. Такая реализация нерациональна. С точки зрения уменьшения аппаратных затрат часто желательно иметь функцию в виде произведения. Для преобразования функции воспользуемся теоремой де Моргана (Шеннона), дважды инвертируя минимизированную функцию:

$$\overline{\overline{F}} = \overline{\overline{\bar{x}y\bar{z} + yvz + \bar{y}\bar{v}z}} ; F = \overline{\bar{x}y\bar{z}} \cdot \overline{yvz} \cdot \overline{\bar{y}\bar{v}z} .$$

В полученном выражении отсутствуют операции логического сложения, следовательно, аппаратная реализация может быть осуществлена без логических элементов ИЛИ. Следует отметить, что минимизация логических выражений имеет целью обеспечение условий оптимальной реализации электронных устройств, использующих логические элементы. Критерии оптимальности при этом определяются конкретными условиями проектирования и использования электронных устройств. Здесь эти вопросы не рассматриваются, поэтому покажем только упрощенную структурную

схему алгоритма минимизации сложной логической функции (рис. 11.9).

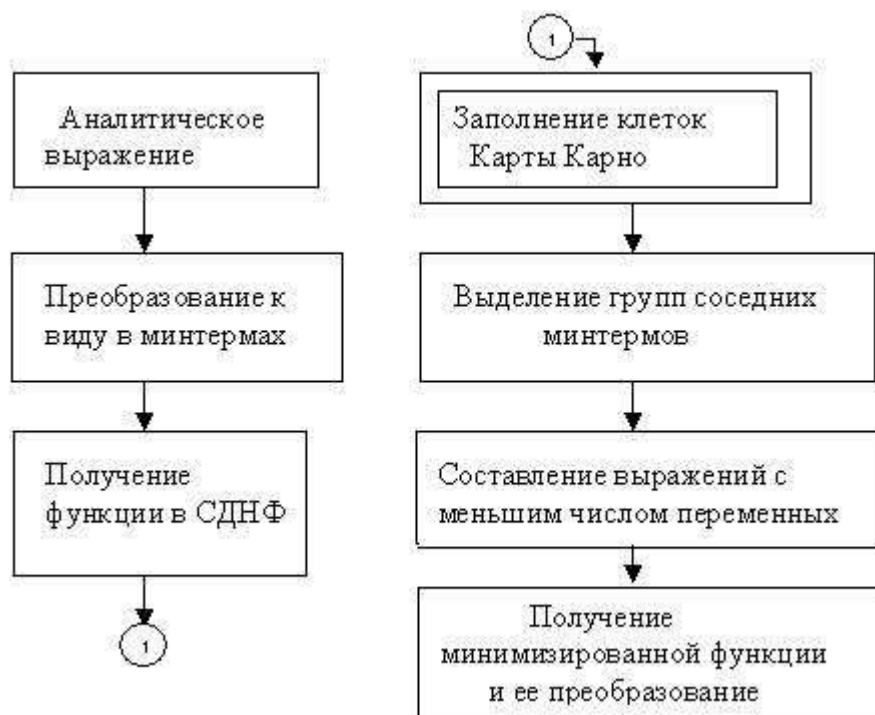


Рис. 11.9. Структурная схема алгоритма минимизации логической функции

11.5. Структура и принцип действия логических элементов

Для построения логических элементов, как устройств электронной техники, в основном используются элементы Шеффера и Пирса, которые являются основными представителями современной потенциальной системы логических элементов. Можно доказать, что достаточно иметь набор одинаковых логических элементов (И-НЕ, либо ИЛИ-НЕ), чтобы только на них построить все многообразие логических схем. Однако такой способ чаще всего оказывается нерациональным, так как требует большого количества этих элементов. На практике в состав серий цифровых схем, выпускаемых промышленностью, входят не только указанные элементы (И-НЕ, ИЛИ-НЕ), но и другие элементы, обладающие большим разнообразием по способу их выполнения, по компоновке и числу входов и выходов. Логические элементы по виду реализуемой функции подразделяют на простейшие элементы одноступенчатой логики (И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ) и элементы двухступенчатой логики (И-ИЛИ, И-ИЛИ-НЕ и др.). На рис. 11.2 – 11.4 показаны

элементы одноступенчатой логики. На рис. 11.10 показаны примеры условных графических обозначений двухступенчатых элементов.

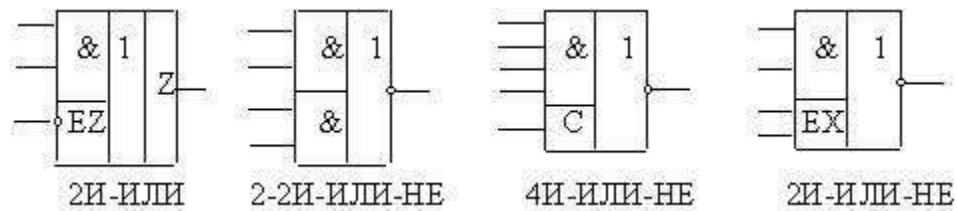


Рис. 11.10. Примеры двухступенчатых логических элементов

Обозначение элемента 2-2И-ИЛИ-НЕ значит, что в составе микросхемы имеются два двухвходовых элемента И, выходы которых подключены к входам элемента ИЛИ, его выход подключен к входу элемента НЕ, выход элемента НЕ является выходом всей микросхемы. Таким образом, в одной микросхеме имеются все три основных элемента. Построение элемента 2-2И-ИЛИ-НЕ с помощью простейших элементов показано на рис. 11.11.

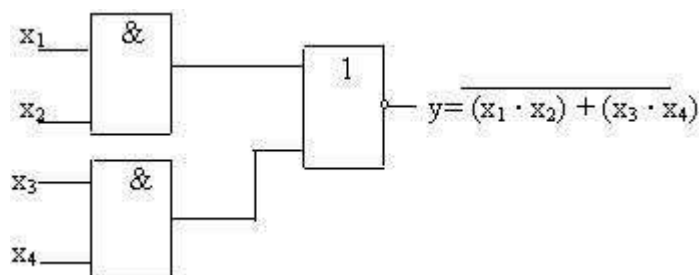


Рис. 11.11. Структурная схема элемента 2-2И-ИЛИ-НЕ

С помощью базовых операций, используемых в двухступенчатой логике, выполняются некоторые функции, нашедшие широкое применение в электронных системах. Примерами таких функций являются: ЗАПРЕТ, ИМПЛИКАЦИЯ (вовлечение), ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ. Таблицы истинности и УГО элементов, реализующих перечисленные функции, показаны на рис. 11.12, 11.13:

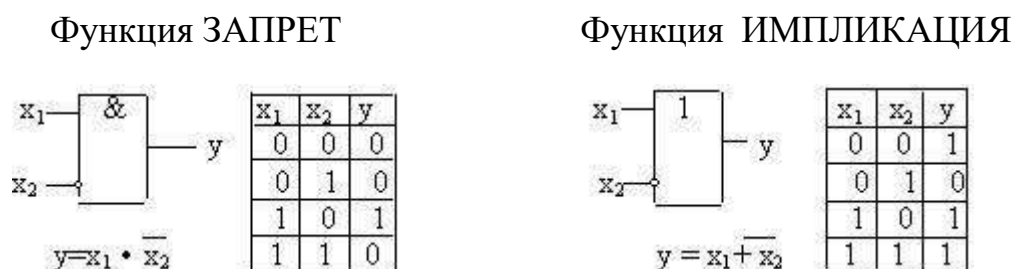


Рис. 11.12. Условные изображения, таблицы истинности и аналитическое представление дополнительных логических функций

Функция ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

равны 1. Если транзистор VT_1 насыщен, то транзистор VT_2 закрыт, так как его базовое напряжение близко к нулю. Соответственно закрыт транзистор VT_4 , так как его базовый ток мал.

Транзистор VT_3 открыт базовым током, протекающим через резистор R_2 . Напряжение источника E через резистор R_4 , открытый транзистор VT_3 и диод VD_1 попадает на выход, т.е. на выходе получим уровень, соответствующий 1. Таким образом, при появлении на входе хотя бы одного сигнала с уровнем, соответствующим логическому нулю, на выходе будем иметь уровень, соответствующий логической единице. Если на все четыре входа подать уровень сигнала, соответствующий логической единице, транзистор VT_1 окажется в режиме отсечки, однако по цепи база-коллектор VT_1 – база-эмиттер транзистора VT_2 будет протекать ток, достаточный для открытия транзистора VT_2 , и, соответственно, транзистора VT_4 . Открытый транзистор VT_2 шунтирует базовую цепь транзистора VT_3 и он закрывается, отсекая выход Y от источника питания. На выходе появляется низкий уровень сигнала, соответствующий логическому нулю. Следовательно, рассматриваемая схема реализует функцию И-НЕ по отношению к сигналам, подаваемым на любой (или на все) из четырех входов.

Примером микросхемы, в которой используются все три основные логические функции, может служить элемент ТТЛ 2-2И-ИЛИ-НЕ, принципиальная схема которого показана на рис. 11.15.

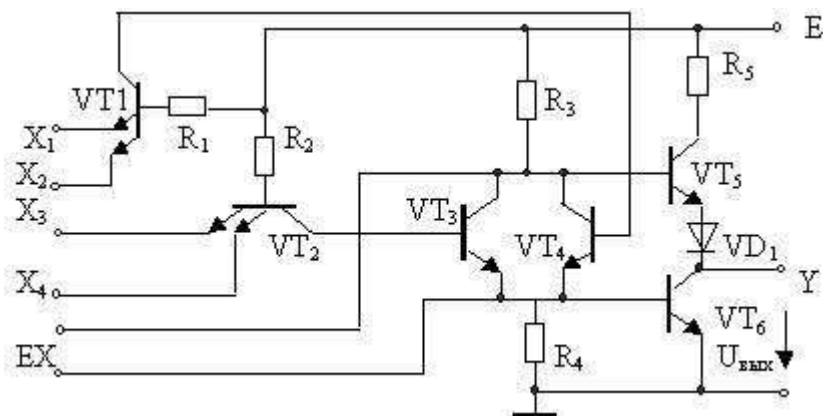


Рис. 11.15. Электрическая принципиальная схема элемента 2-2И-ИЛИ-НЕ

Функцию И в этой схеме выполняют двухэмиттерные транзисторы VT_1 и VT_2 , функцию ИЛИ – транзисторы VT_3, VT_4 . Принцип действия каждой пары транзисторов (VT_1, VT_2), (VT_3, VT_4) практически не

отличается от работы транзисторов VT_1 , VT_2 схемы рис. 11.14, а. Для появления сигнала 0 на выходе логического элемента безразлично, открыт только один из транзисторов VT_1 , VT_2 или открыты оба, что соответствует реализации функции ИЛИ. Выводы, обозначенные EX , служат для подключения специальных схем (расширителей по входу), с помощью которых можно увеличить количество входных сигналов [1, 2].

11.6. Основные параметры и характеристики логических элементов

Схемотехническая реализация цифровых логических устройств осуществляется на основе типовых (базовых) функциональных элементов. Классификацию параметров и характеристик логических элементов можно произвести по следующим признакам:

1. Функциональные признаки:
 - а) реализуемая логическая функция;
 - б) нагрузочная способность (коэффициент разветвления по выходу) K_p ;
 - в) коэффициент объединения по входу K_o .
2. Статические характеристики:
 - а) входные;
 - б) выходные;
 - в) передаточная;
 - г) уровни сигналов, соответствующих логической единице и логическому нулю;
 - д) статическая помехоустойчивость.
3. Импульсные и переходные характеристики (динамические):
 - а) среднее время задержки распространения сигнала;
 - б) предельная рабочая частота;
 - в) необходимая скорость нарастания управляющего напряжения на входе логического элемента;
 - г) динамическая помехоустойчивость.
4. Требования к источнику питания:
 - а) потребляемая мощность;
 - б) входные токи при входных напряжениях низкого и высокого уровня;
 - в) напряжение источника питания и допустимые отклонения от номинального значения.

5. Климатические признаки:

- а) диапазон рабочих температур;
- б) влагоустойчивость и др.

6. Конструктивные и другие признаки:

- а) вес;
- б) габариты;
- в) стоимость и т.д.

Краткое описание основных параметров и характеристик. Нагрузочная способность логического элемента характеризуется коэффициентом разветвления K_p , который показывает, какое число логических входов устройств этой же серии может быть одновременно присоединено к выходу данного логического элемента без нарушения его работоспособности. Увеличение K_p расширяет логические возможности элемента, позволяет уменьшить число элементов в цифровом устройстве. Однако это увеличение ухудшает другие параметры: быстродействие, помехоустойчивость, увеличивает потребляемую мощность. По этой причине в составы серий цифровых интегральных схем часто входят логические элементы с различной нагрузочной способностью: основные с $K_p = 4 - 10$ и буферные с $K_p = 20 - 50$. Это позволяет более гибко проектировать цифровые устройства, достигая оптимальных показателей по потребляемой мощности и количеству логических элементов.

Коэффициент объединения по входу K_o характеризует максимальное число логических входов функционального элемента. С увеличением K_o расширяются логические возможности схемы за счет выполнения функций с большим числом аргументов на одном базовом логическом элементе, однако это ухудшает нагрузочную способность, помехоустойчивость и быстродействие. Обычно логические элементы выполняются с $K_o = 2 - 8$. Увеличение K_o сверх восьми обеспечивается за счет применения специальных логических расширителей.

Статические характеристики рассмотрим на примере характеристик базового элемента серии 155 [22] (серия устаревшая).

Передаточная и входная характеристики базового элемента ТТЛ серии 155 приведены на рис. 11.16.

На характеристиках можно отметить следующие параметры: $U_{вх1п} \approx 1,5$ В; $U_{вх0п} \approx 0,8$ В; $U_{вых1} \approx 4$ В; $U_{вых0} \approx 0,4$ В, где $U_{вх1п}$, $U_{вх0п}$ – пороговые напряжения соответственно высокого и низкого уровней – это наименьшее ($U_{вх1п}$) или наибольшее ($U_{вх0п}$) значения соответствующих уровней, при которых начинается переход логического элемента в другое состояние.

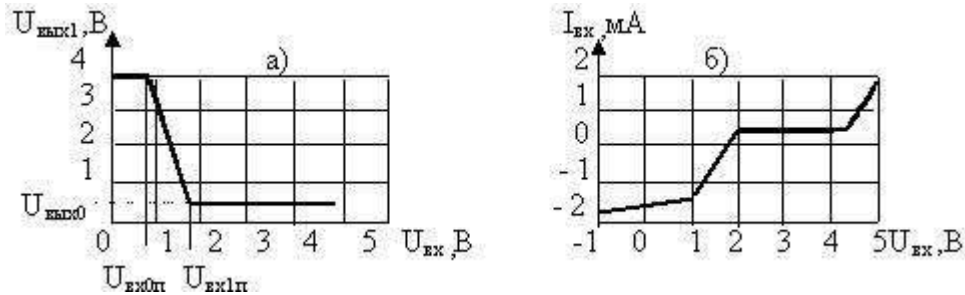


Рис. 11.16. Характеристики логического элемента ТТЛ:
а – передаточная; б – входная

Входная характеристика (рис. 11.16, б) показывает, что при $U_{вх} > 4$ В начинается заметный рост входного тока. По этой причине для логических элементов серии ТТЛ недопустимо увеличение $U_{вх}$ свыше 5 В. Выходные характеристики элементов ТТЛ имеют вид, показанный на рис. 11.17.

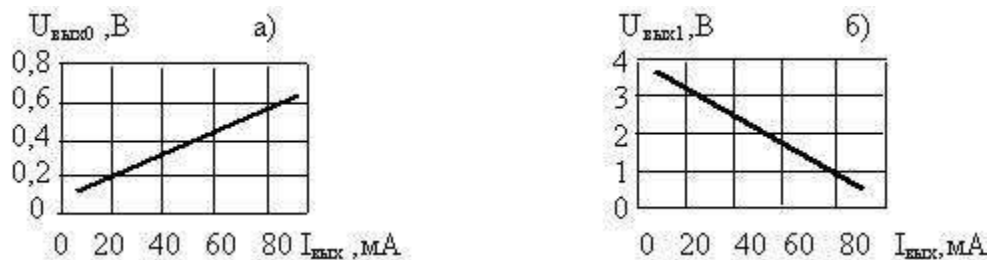


Рис. 11.17. Выходные характеристики логических элементов ТТЛ:
а – для сигналов низкого уровня; б – для сигналов высокого уровня

По характеристикам видно, что уровень выходного сигнала существенно зависит от величины сопротивления нагрузки. При заданных допустимых значениях уровней выходных напряжений нагрузка не должна превышать допустимых значений. Поэтому в составе серий микросхем различают микросхемы с нормальной и повышенной нагрузочной способностью. Например, в серии 155 микросхемы с $I_{вых0} \leq 16$ мА, $K_p \leq 10$ относятся к микросхемам

с нормальной нагрузочной способностью, а схемы с повышенной нагрузочной способностью имеют $I_{\text{вых}0} = 48$ мА. По выходным характеристикам можно определить, что выходные сопротивления логических элементов ТТЛ имеют небольшую величину. По этой причине нельзя объединять между собой выходы нескольких ТТЛ ЛЭ, так как в случае разных уровней выходных сигналов через выходные транзисторы ЛЭ (рис. 11.15) будут протекать большие токи. Чтобы осуществлять непосредственное соединение выводов нескольких логических элементов между собой и получать разные уровни выходного сигнала используют схемы с «открытым» электродом, например, коллектором, т.е. схемы, на выходе которых установлен транзистор, чья коллекторная цепь оставлена свободной [22]. Следует заметить, что «открытым» может быть не только коллектор, но и эмиттер у биполярных транзисторов, а также сток или исток у полевых.

Быстродействие логического элемента характеризуется временем задержки распространения сигналов при включении t_{310} , выключении t_{301} и средним временем t_{3c} (рис. 11.18).

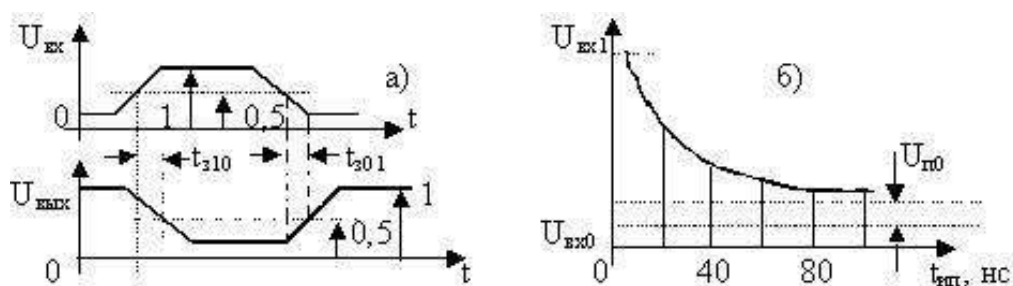


Рис. 11.18. Определение времени задержки распространения сигнала (а) и изменение амплитуды импульсной помехи с изменением её длительности (б)

Время задержки распространения сигнала при включении ЛЭ – это интервал времени между входным и выходным импульсами при переходе выходного напряжения от уровня логической единицы к уровню логического нуля, измеренный на уровне 0,5 амплитуды.

Аналогично время задержки распространения сигнала при выключении ЛЭ - это интервал времени между входным и выходным импульсами при переходе выходного напряжения от уровня логического нуля к уровню логической единицы, измеренный на уровне 0,5 (рис. 11.18, а). Среднее время задержки распространения – это интер-

вал времени, равный полусумме времен задержки распространения сигнала при включении и выключении логического элемента:

$$t_{3c} = (t_{301} + t_{310})/2. \quad (11.6)$$

Помехоустойчивость логического элемента различается статическая и динамическая. Статическая помехоустойчивость определяется как минимальная разность между значениями выходного и входного сигналов данного логического уровня:

$$\begin{aligned} U_{п1} &= U_{вых1} - U_{вх1}, \\ U_{п0} &= U_{вх0} - U_{вых0}. \end{aligned} \quad (11.7)$$

Из (11.7) можно заключить, что статическая помехоустойчивость – это минимальное значение напряжения помехи на выходе ЛЭ, которое может вызвать срабатывание подключенного к нему ЛЭ.

Помехи могут быть импульсными. При малых длительностях помехи, меньших или соизмеримых с t_{3c} , этот импульс напряжения может быть значительно больше напряжения статической помехи и не вызывать срабатывания ЛЭ. Это объясняется наличием емкостей между элементами микросхемы, емкостей полупроводниковых структур, проявляющимися при больших частотах сигналов. Динамическую помехоустойчивость обычно характеризуют графиком, связывающим длительность и амплитуду допустимой помехи (рис. 11.18, б).

Важным параметром логического элемента является потребляемая мощность $P_{п}$ или ток потребления $I_{п}$, которые приводятся в справочных данных. В целях сравнения между собой микросхем отдельных серий иногда используют интегральный параметр, называемый энергией переключения:

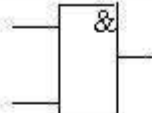
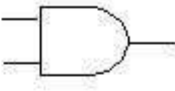
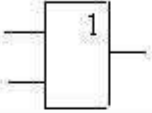
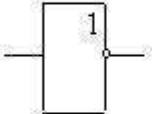
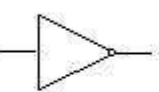
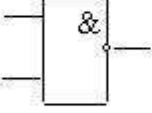
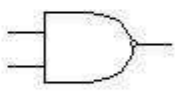
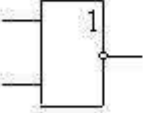
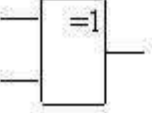
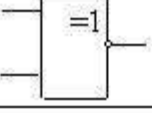
$$\mathcal{E}_{п} = P_{п} \cdot t_{3c}. \quad (11.8)$$

Смысл этого параметра в том, что он характеризует работу, затрачиваемую на выполнение одного переключения.

Условные графические обозначения логических элементов в нашей стране и за рубежом разные, поэтому их соответствие приведено в табл. 11.3.

Таблица 11.3

Условные графические обозначения логических элементов

Вид операции 1	УГО		
	2	3	4
	Российское	Зарубежное	
		Общее	Интегральное исполнение
И			
ИЛИ			
НЕ			
И-НЕ			
ИЛИ-НЕ			
ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ			
ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ-НЕ			

12. КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Ранее уже отмечалось, что к комбинационным устройствам относятся функциональные узлы, в которых отсутствуют элементы памяти. Состояние комбинационного узла однозначно определяется комбинацией входных сигналов в данный момент и не зависит от предыдущего состояния. К таким узлам относятся шифраторы, дешифраторы, сумматоры, мультиплексоры, демультиплексоры, компараторы, преобразователи кодов и другие.

12.1. Шифраторы и дешифраторы

Шифратор – это функциональный узел, преобразующий поступающие на его входы сигналы (команды) в n -разрядный двоичный код. «Командами» могут быть, например, десятичные цифры. Построим шифратор, преобразующий десятичные цифры в нормальный двоичный код (НДК). Функциональное описание такого шифратора представим в виде таблицы истинности, в которой кодируемые цифры обозначим переменной x_n , где $n = 0 \dots 9$, а в качестве кода, присваемого кодируемым цифрам, выберем четырехразрядный двоичный код.

Таблица 12.1

Таблица истинности шифратора

Число	Код			
	a_3	a_2	a_1	a_0
x_0	0	0	0	0
x_1	0	0	0	1
x_2	0	0	1	0
x_3	0	0	1	1
x_4	0	1	0	0
x_5	0	1	0	1
x_6	0	1	1	0
x_7	0	1	1	1
x_8	1	0	0	0
x_9	1	0	0	1

В табл. 12.1 числа $a_0 \dots a_3$ представлены как функции аргументов x_n , принимающих различные значения десятичных цифр. Для синтеза схемы, реализующей указанные функции, записываем их представления в аналитической форме по табличным данным: $a_0 = x_1 + x_3 + x_5 + x_7 + x_9$; $a_1 = x_2 + x_3 + x_6 + x_7$; $a_2 = x_4 + x_5 + x_6 + x_7$; $a_3 = x_8 + x_9$. В полученных выражениях знак $+$ обозначает логическую операцию ИЛИ, поэтому очевидная (не минимизированная) структура устройства должна содержать четыре дизъюнктора, каждый из которых имеет разное число входов (рис. 12.1).

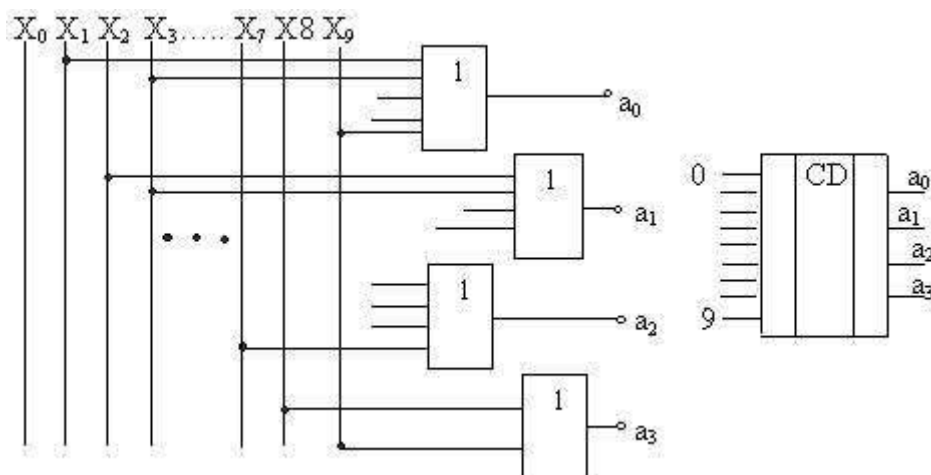


Рис. 12.1. Структурная схема и интегральное изображение шифратора

Дешифратор – это функциональный узел, преобразующий n -разрядный двоичный код в комбинацию выходных сигналов (команд). Этот n -разрядный код дает 2^n наборов входных переменных, которые могут превратиться в 2^n выходных сигналов. В этом случае дешифратор называют полным. Если число выходных сигналов меньше 2^n , то дешифратор неполный.

Рассмотрим методику построения простейшего дешифратора, имеющего два входа и четыре выхода (дешифратор 2 – 4) (табл. 12.2). Составляем таблицу функционирования дешифратора, исходя из его функционального назначения: 2-разрядный код, подаваемый на вход, может быть превращен на выходе в четыре выходных сигнала. Пусть таким выходным сигналом будет позиционный код, в котором значение определяется положением «1» в цепочке «0».

Рассматривая логические переменные « x » как функции входных логических переменных « a », запишем логические выражения для выходных сигналов: $x_0 = a_0 \cdot a_1$; $x_1 = a_0 \cdot a_1$; $x_2 = a_0 \cdot a_1$; $x_3 = a_0 \cdot a_1$.

Таблица 12.2

Таблица истинности дешифратора

Входной код		Выходной сигнал			
a_1	a_0	x_0	x_1	x_2	x_3
0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	1	0
1	1	0	0	0	1

Анализ полученных выражений показывает, что структурная схема, реализующая функцию разрабатываемого дешифратора, должна содержать два инвертора и четыре двухвходовых конъюнктора. Син-

тезированная таким способом структурная схема и её интегральное изображение показаны на рис. 12.2.

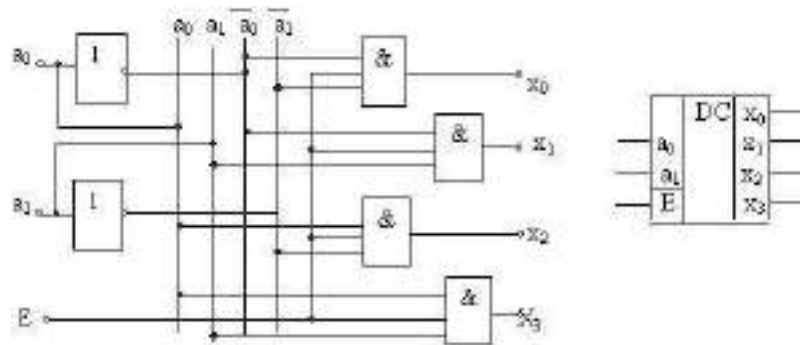


Рис. 12.2. Структурная схема дешифратора 2 – 4 и его интегральное изображение

Реальные дешифраторы обычно снабжены дополнительным входом, разрешающим или запрещающим выполнение основной функции. Например, в схеме (рис. 12.2) можно снабдить каждый конъюнктор дополнительным входом, объединить эти входы и обеспечить внешний доступ к ним (обычно этот дополнительный вход обозначают буквой E). Если на вход E подать логический 0, функции дешифратора будут запрещены, а на выходах установится инверсный (нулевой) уровень выходного сигнала. Логическая 1, установленная на дополнительном входе E , не препятствует работе дешифратора. Аналогичным способом можно синтезировать дешифраторы (1 – 2), (3 – 8) и т.д.

Более сложные дешифраторы можно построить на основе каскадного соединения простых. В качестве примера рассмотрим структурную схему дешифратора (4 – 16), построенного на основе дешифратора (2 – 4) (рис. 12.3).

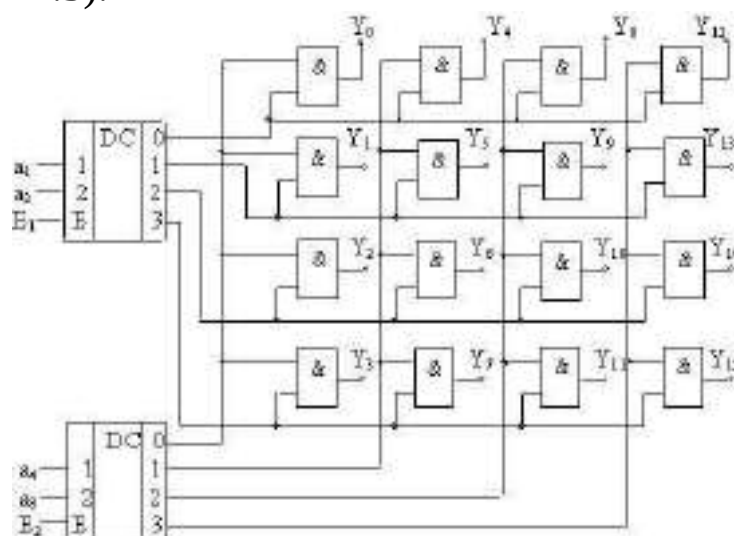


Рис. 12.3. Дешифратор (4 – 16) на основе дешифраторов (2 – 4)

В этом дешифраторе вторая ступень выполнена на матрице двух-входовых конъюнкторов, активируемых сигналами, поступающими с выходов дешифраторов (2 – 4). Запрещение работы дешифратора может осуществляться либо по вертикальным, либо по горизонтальным шинам, при этом на одном из входов разрешения E_1, E_2 должен присутствовать сигнал логического 0. Дешифратор (5 – 32) может быть составлен из одного дешифратора (2 – 4) и четырех дешифраторов (3 – 8), управляемых по входу разрешения выходными сигналами дешифратора (2 – 4) [20].

12.2. Мультиплексоры и демультиплексоры

Мультиплексор – это функциональный узел, который осуществляет управляемую коммутацию логических сигналов с входных линий на одну выходную линию. Коммутация определенной входной линии осуществляется в соответствии с двоичным адресным кодом, установленным на адресных входах мультиплексора.

Если адресный код имеет n разрядов, то можно осуществить 2^n коммутаций входных линий на одну выходную, следовательно, мультиплексор с n -разрядным адресным входом может иметь любое число входных линий, не превышающее 2^n .

В качестве примера рассмотрим методику построения мультиплексора, осуществляющего коммутацию четырех входных линий x_0, x_1, x_2, x_3 на выходную линию Y . Число разрядов адресных входов определяется по выражению $n = \log_2 N$, где N – число входных линий, (n округляется в сторону увеличения). В нашем случае $n = 2$. Для определения структуры составляем таблицу функционирования мультиплексора, обозначив адресные входы символами a_0, a_1 (табл. 12.3).

По данным таблицы можно записать характеристическое уравнение данного мультиплексора:

$$Y = \overline{a_0} \overline{a_1} x_0 + \overline{a_0} a_1 x_1 + a_0 \overline{a_1} x_2 + a_0 a_1 x_3.$$

Таблица 12.3
Таблица истинности
мультиплексора

a_0	a_1	Y
0	0	x_0
0	1	x_1
1	0	x_2
1	1	x_3

Анализ уравнения показывает, что структура мультиплексора должна содержать два инвертора, четыре конъюнктора и один четырехходовый дизъюнктор. Синтезированная по таким признакам схема показана на рис. 12.4.

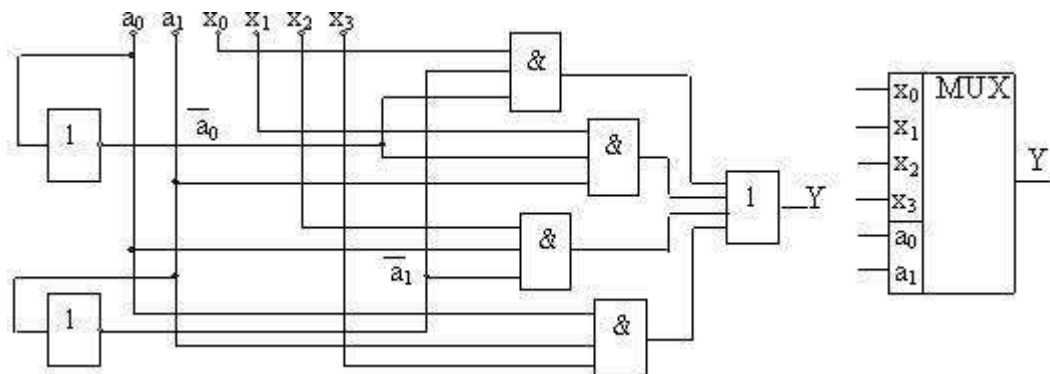


Рис. 12.4. Структурная схема мультиплексора 4 – 1 и его интегральное изображение

Наращивание размерности мультиплексора возможно с помощью пирамидальной структуры из нескольких мультиплексоров меньшей размерности. В этом случае первый каскад должен содержать столько мультиплексоров, сколько необходимо для обеспечения нужного (суммарного) количества входных линий. Мультиплексоры первого каскада адресуются одним и тем же кодом, составленным из соответствующего числа младших разрядов общего адресного кода. Если число адресных разрядов мультиплексоров первого каскада n_1 , а общее число адресных разрядов – n (соответствует суммарному числу адресуемых входных линий 2^n), то мультиплексор второго каскада должен иметь $(n - n_1)$ адресных разрядов.

Например, для построения мультиплексора 32 – 1 на мультиплексорах меньшей размерности, в первом каскаде можно использовать четыре мультиплексора 8 – 1, а во втором каскаде – один мультиплексор 4 – 1. При этом в пятиразрядном адресном коде ($2^5 = 32$) два старших разряда принадлежат мультиплексору второго каскада, а три младших – объединённым адресным входам мультиплексоров первого каскада. Для мультиплексора второго каскада входными линиями являются выходные линии мультиплексоров первого каскада.

Реализация логических функций на основе мультиплексоров. С помощью мультиплексора, имеющего n адресных входов, можно последовательно адресовать на выход 2^n разрядов информационного слова, поданного на информационные входы. Для воспроизведения на выходе мультиплексора значения логической функции, имеющей

n аргументов, используется условие, согласно которому каждому набору аргументов соответствует передача на выход одного из сигналов, поданных на информационные входы. Следовательно, если на адресные входы мультиплексора подать кодовый набор аргументов функции, а на информационные входы – соответствующие значения функции, то получим устройство, воспроизводящее на выходе значения функции, соответствующие набору аргументов этой функции, установленному на адресных входах мультиплексора. На рис. 12.5 приведен пример использования мультиплексора 8 – 1 в качестве логического устройства («универсального логического элемента» согласно [20]) для реализации функции трех аргументов $F(A_4, A_2, A_1)$.

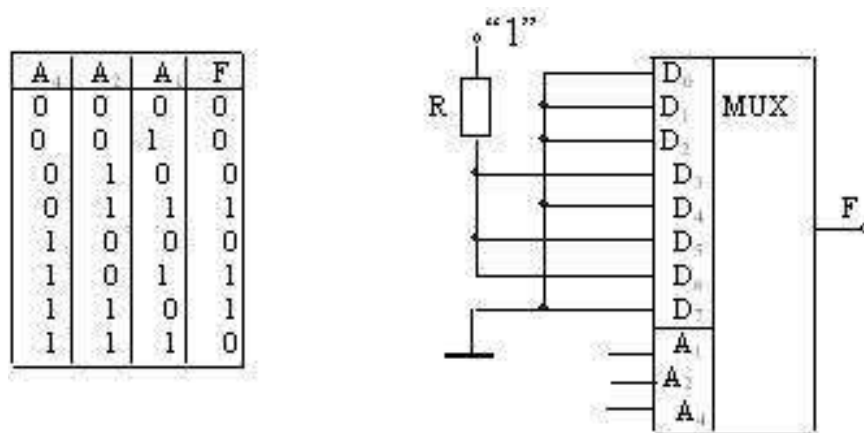


Рис. 12.5. Схема включения мультиплексора 8 – 1 для реализации функции трех аргументов, заданной таблично

Демультимплексор. Демультимплексор выполняет операцию, обратную операции мультиплексора, т.е. передаёт данные из одной входной линии в одну из нескольких выходных линий. Управление коммутацией осуществляется с помощью адресного кода, устанавливаемого на адресных входах, при этом адресуются, в отличие от мультиплексора, не входные, а выходные выводы. В общем случае число выходных линий N определяется разрядностью n -адресного кода согласно соотношению $N = 2^n$. Синтез демультимплексора рассмотрим на примере демультимплексора 1 – 4, для которого $N = 4$. Составляем таблицу истинности (таблицу функционирования), в которой адресный код обозначен символами a_k , выходные линии символами Y_i , а сигнал на входе обозначен символом F (табл. 12.4).

Таблица 12.4

Таблица истинности демультимплексора

		a			
0	1	0	1	2	3
		0			
		1			
		0			
		1			

В соответствии с таблицей истинности характеристические уравнения такого устройства будут: $Y_0 = \overline{a_0} \overline{a_1} F$; $Y_1 = \overline{a_0} a_1 F$; $Y_2 = a_0 \overline{a_1} F$; $Y_3 = a_0 a_1 F$. Соответствующая этим уравнениям структурная схема должна содержать два инвертора и четыре трёхвходовых конъюнктора (рис. 12.6).

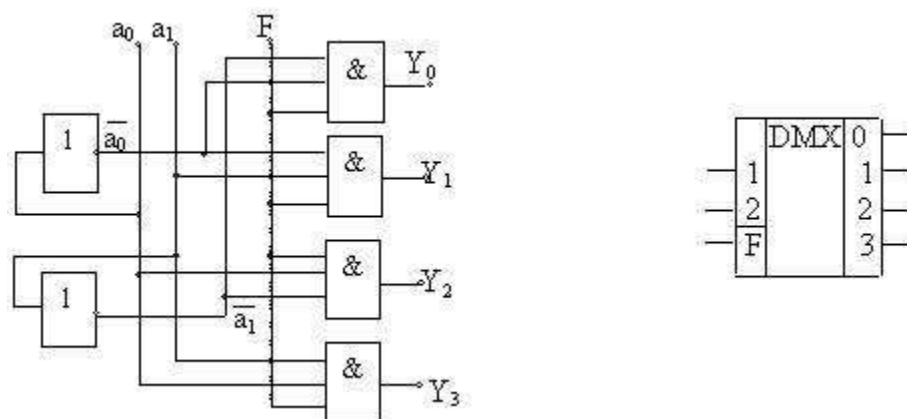


Рис. 12.6. Структурная схема демультиплексора 1 – 4 и его УГО

12.3. Сумматоры

Сумматором называется комбинационный функциональный узел, предназначенный для арифметического сложения двоичных чисел. Основным узлом сумматора является одноразрядный сумматор, на основе которого строятся многоразрядные сумматоры. Одноразрядный сумматор выполняет арифметическое сложение одноразрядных двоичных чисел a_i , b_i и бита переноса c_i из младшего разряда, образуя на выходах значения суммы S_i и бита переноса в старший разряд c_{i+1} . Сумматор, не имеющий бита переноса из младшего разряда, называют полусумматором. Он имеет два входа и два выхода в отличие от «полного» одноразрядного сумматора, имеющего три входа и два выхода. Таблицы истинности для одноразрядных сумматоров показаны в табл. 12.5.

Таблица 12.5

Таблицы истинности сумматора

a_i	b_i	c_i	S_i	c_{i+1}
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

a_0	b_0	S_0	c_0
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

В соответствии с таблицами истинности можно составить характеристические уравнения для одноразрядного полного сумматора и полусумматора:

$$S_i = \overline{a_i}b_ic_i + \overline{a_i}\overline{b_i}c_i + a_i\overline{b_i}\overline{c_i} + a_ib_i\overline{c_i}; \quad S_0 = a_0b_0 + a_0\overline{b_0};$$

$$c_{i+1} = \overline{a_i}b_i + \overline{a_i}c_i + b_i\overline{c_i}; \quad c_0 = a_0\overline{b_0}.$$

По полученным характеристическим уравнениям нетрудно синтезировать структурные схемы, используя нужные логические элементы. Выражение для бита переноса c_{i+1} записано после минимизации полного выражения, полученного из таблицы истинности.

Обычно сумматоры выполняются многоразрядными. Число входов и выходов такого сумматора определяется разрядностью слагаемых. Структуру многоразрядного сумматора определяет способ передачи сигнала переноса от младшего разряда к старшему. Различают два основных вида сумматоров: с последовательным и параллельным переносом. На основе этих вариантов разработано несколько видов сумматоров: для сложения параллельных и последовательных операндов, сумматоры групповой структуры, накапливающие сумматоры и др.

В сумматорах с последовательным переносом выход переноса i -разряда последовательно соединен с входом $(i+1)$ -разряда. Структурная схема такого сумматора показана на рис. 12.7.

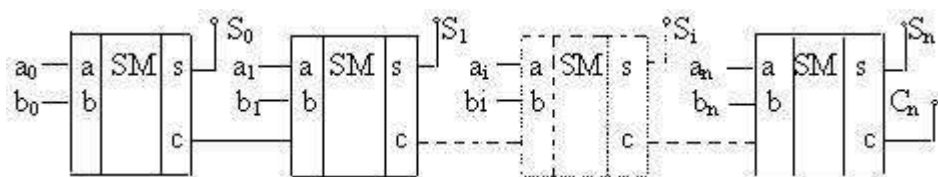


Рис. 12.7. Структурная схема многоразрядного сумматора с последовательным переносом

Важным параметром сумматора является его быстродействие. Для получения максимального быстродействия разработаны сумма-

торы для параллельных операндов с параллельным переносом. В таких сумматорах сигналы переноса для каждого разряда формируются специальными схемами, на входы которых поступают те переменные, которые необходимы для выработки бита переноса. К ним относятся внешний входной перенос (если он есть) и значения всех разрядов слагаемых, младших относительно данного.

Структурная схема сумматора для сложения двух n -разрядных чисел представлена на рис. 12.8, где CR – схемы формирования переносов.

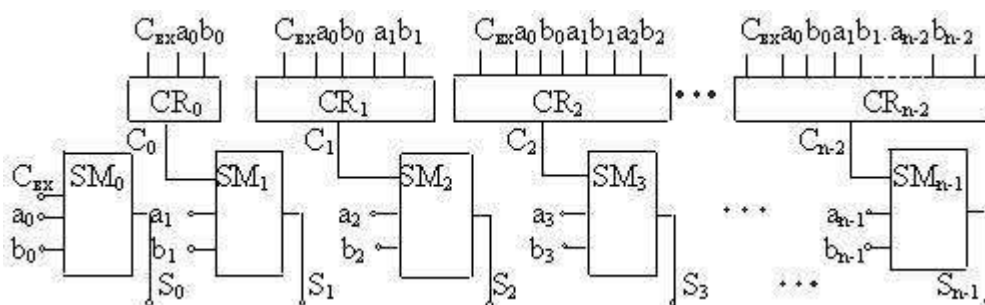


Рис. 12.8. Структурная схема сумматора для сложения двух параллельных операндов с параллельным переносом

Быстродействие в таких сумматорах достигается за счет того, что биты переносов формируются практически одновременно с формированием результата.

Накапливающий сумматор представляет собой сочетание комбинационного сумматора и тактируемого регистра, причем очередное слагаемое добавляется к содержимому сумматора и результат замещает старое значение суммы [20].

12.4. Цифровой компаратор

Компаратор (устройство сравнения) служит для определения соотношения между двумя кодовыми словами. Такими соотношениями можно считать: «меньше», «равно», «больше». Принято считать, что выходные функции, вырабатываемые компараторами, принимают единичные значения, если соблюдаются указанные выше соотношения, и равны нулю, если не соблюдаются. Например, функция равенства $F_{A=B} = 1$, если $A = B$ и равна нулю, если $A \neq B$. С учетом приня-

того соглашения таблица истинности компаратора двух одноразрядных чисел будет выглядеть так, как показано на рис. 12.9.

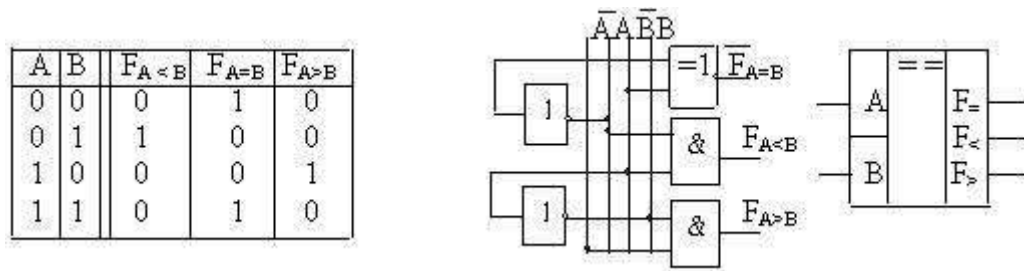


Рис. 12.9. Таблица истинности, структурная схема и условное обозначение компаратора двух одноразрядных слов

Устройства сравнения строятся на основе поразрядных операций над одноименными разрядами обоих слов. Признак равенства разрядов $r_i = A_i \oplus B_i$. Компараторы для слов большей разрядности получают наращиванием размерности путем использования нескольких схем компараторов. Например, для сравнения восьмиразрядных чисел можно использовать две четырехразрядные схемы. Для этой цели в четырехразрядном компараторе предусмотрены три дополнительных входа: $A > B$, $A = B$, $A < B$, к которым подводятся соответствующие выходы схемы, выполняющей сравнение младших разрядов.

12.5. Преобразователи кодов

Преобразователи кодов используются для перевода представления информации из одного кода в другой. Необходимость такого перевода возникает потому, что для представления информации используют различные двоичные и двоично-десятичные коды. Таблицы истинности некоторых кодов для представления десятичных чисел представлены в табл. 12.6.

Синтез преобразователей кодов осуществляется в соответствии с таблицами их функционирования. В качестве примера рассмотрим синтез схемы, преобразующей двоично-десятичный код (8421) в код Айкена (2421). С этой целью каждую переменную кода Айкена будем рассматривать как функцию соответствующих коэффициентов двоично-десятичного кода. В этом случае можно в соответствии

с таблицами составить характеристические уравнения для каждой переменной кода 2421. Например, для переменной k_3 имеем:

$$k_3 = e_3 e_2 e_1 e_0 + e_3 e_2 e_1 e_0 + e_3 e_2 e_1 e_0 + e_3 e_2 e_1 e_0 + e_3 e_2 e_1 e_0.$$

Таблица 12.6

Таблицы истинности некоторых кодов

Десятичное Число	прямой код				обратный код				Дополнительный				Код Грея				Код 8-4-2-1				Код 2-4-2-1			
	a	a	a	a	b	b	b	b	c	c	c	c	d	d	d	d	e	e	e	e	k	k	k	k
0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
3	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
5	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0
7	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
8	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
9	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1
10	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1								
11	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0								
12	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0								
13	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1								
14	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1								
15	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0								

Составив характеристические уравнения для всех переменных кода 2421, можно упростить их по правилам логических преобразований, затем построить структурную схему преобразователя.

Однако более эффективным является метод структурного проектирования с использованием карт Карно. Согласно этому методу составляем карты Карно для переменных k_3, k_2, k_1, k_0 , причем клетки, не заполненные значениями аргументов $e_0 - e_3$, заполняем значениями 1 либо 0, делаем соответствующие объединения и записываем минимизированные выражения для переменных k (рис. 12.10).

k_3					k_2					k_1					k_0								
		e_0e_1						e_0e_1						e_0e_1						e_0e_1			
e_2e_3		00	10	11	01	e_2e_3		00	10	11	01	e_2e_3		00	10	11	01	e_2e_3		00	10	11	01
00		0	0	0	0	00		0	0	0	0	00		0	0	1	1	00		0	1	1	0
10		0	1	1	1	10		1	0	1	1	10		0	1	0	0	10		0	1	1	0
11		x	x	x	x	11		x	x	x	x	11		x	x	x	x	11		x	x	x	x
01		1	1	x	x	01		1	1	x	x	01		1	1	x	x	01		0	1	x	x

Рис. 12.10. Карты Карно для преобразователя кодов

В результате минимизации получим: $k_3 = e_3 + e_2 e_1 + e_2 e_0$; $k_2 = e_3 + e_2 e_1 + e_2 e_0$; $k_1 = e_3 + e_2 e_1 + e_2 e_1 e_0$; $k_0 = e_0$.

Полученные выражения полностью определяют структуру и состав элементов преобразователя. Однако технологически более

рациональны структуры, выполненные на однотипных логических элементах, например, на элементах И-НЕ. Структурная схема такого преобразователя представлена на рис. 12.11.

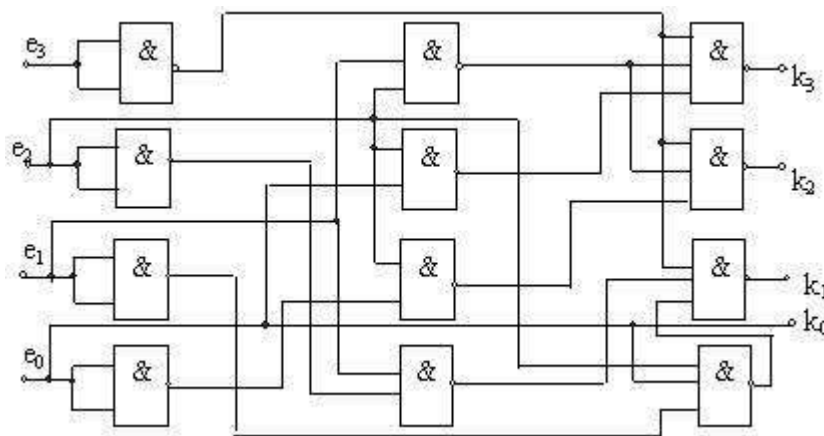


Рис. 12.11. Структурная схема преобразователя кода 8421 в код 2421

12.6. Арифметико-логическое устройство

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) – это функциональный узел, предназначенный для реализации арифметических и логических операций по обработке цифровой информации. Типичное АЛУ (обычно четырёхразрядное) имеет входы операндов A и B , входы выбора операций S , вход переноса C_i и вход M (Mode), сигнал на котором задает тип выполняемых операций: логические ($M = 1$) или арифметико-логические ($M = 0$). Перечень выполняемых АЛУ операций приведен на рис. 12.12 [20].

Набор логических операций АЛУ позволяет воспроизводить все функции двух переменных. В арифметико-логических операциях сочетаются логические и арифметические операции одновременно. Выражение типа $A \vee \bar{B} + AB$ следует понимать следующим образом: вначале поразрядно выполняется операция инвертирования ($\bar{B}$), затем логическое сложение ($A \vee \bar{B}$), умножение (AB) и последующее арифметическое сложение.

Для выполнения операций над словами большой размерности АЛУ соединяются друг с другом путем последовательных или параллельных переносов. Организацию параллельных переносов осуществляют с помощью специальных схем-блоков ускоренного переноса, для чего в схеме АЛУ (рис. 12.12) предусмотрены два дополни-

тельных выхода (G , H), позволяющих организовать параллельный перенос.

№	S	Логические функции ($M=1$)	Арифметико-логические функции ($M=0$)
0	0000	$\overline{A}$	$A+C_1$
1	0001	$A \vee B$	$A \vee B + C_1$
2	0010	$\overline{A}B$	$A \vee \overline{B} + C_1$
3	0011	0000	$1111 + C_1$
4	0100	$\overline{A}\overline{B}$	$A + \overline{A}B + C_1$
5	0101	$\overline{B}$	$A \vee B + \overline{A}B + C_1$
6	0110	$A \oplus B$	$A + \overline{B} + C_1$
7	0111	$\overline{A}B$	$\overline{A}B + 1111 + C_1$
8	1000	$\overline{A} \vee B$	$A + \overline{A}B + C_1$
9	1001	$\overline{A} \oplus B$	$A + B + C_1$
10	1010	B	$A \vee \overline{B} + \overline{A}B + C_1$
11	1011	AB	$\overline{A}B + 1111 + C_1$
12	1100	1111	$A + A + C_1$
13	1101	$A \vee \overline{B}$	$A \vee B + A + C_1$
14	1110	$A \vee B$	$A \vee \overline{B} + A + C_1$
15	1111	A	$A + 1111 + C_1$

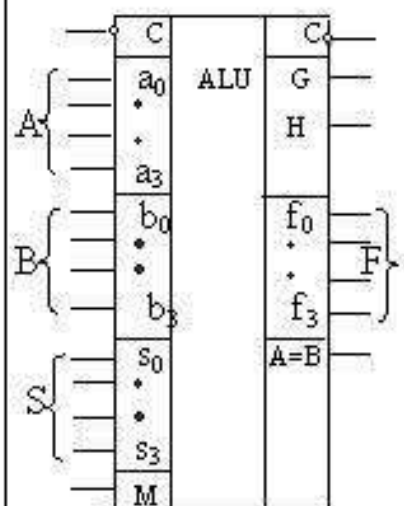


Рис. 12.12. Таблица функций и условное изображение 4-разрядного АЛУ

13. ТРИГГЕРЫ И ЦИФРОВЫЕ АВТОМАТЫ

Триггер – устройство, имеющее два устойчивых состояния, у которого переход из одного состояния в другое происходит при воздействии управляющего сигнала вследствие регенеративного процесса.

Слово триггер означает спусковое устройство – «курок». Отличительной способностью симметричного триггера является свойство запоминания двоичной информации, т.е. *триггер обладает памятью*, под которой подразумевают способность оставаться в одном из двух состояний и после прекращения действия переключающего (управляющего) сигнала. Приняв одно из состояний за «1», а другое за «0», можно считать, что триггер может хранить (помнить) один разряд числа, записанного в двоичном коде, (1 бит).

Регенеративным обычно называют процесс, сопровождающийся самовозбуждением, (самостимулированием). Такой процесс наблюдается в электрической цепи, охваченной положительной обратной связью с петлевым усилением $K\beta > 1$, он характеризуется резким изменением токов и напряжений в цепи.

13.1. Триггерная схема на двух усилительных каскадах

Рассмотрим принцип действия триггера, для чего возьмем два простейших усилителя и соединим их так, чтобы они были охвачены ПОС (рис. 13.1).

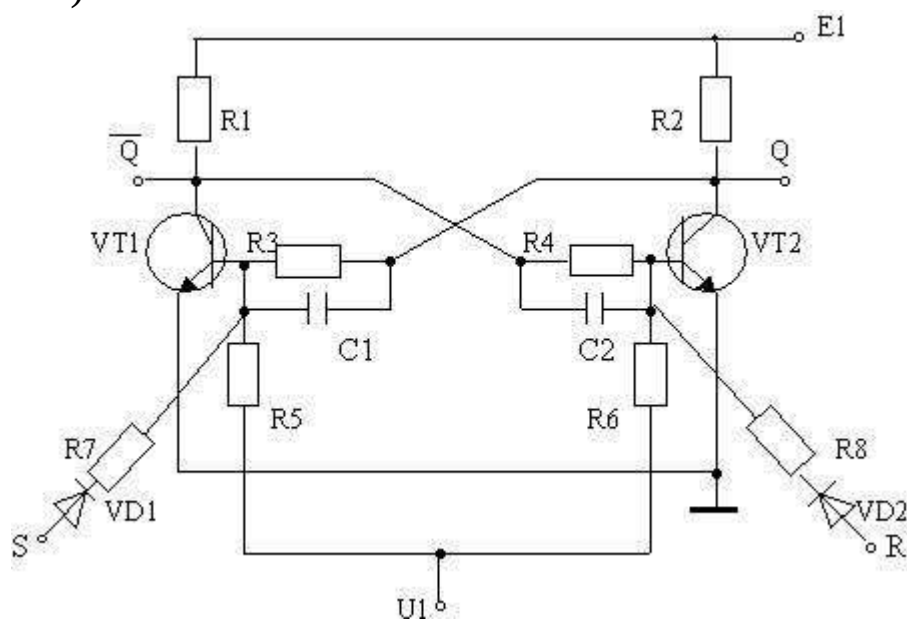


Рис. 13.1. Триггерная схема на двух транзисторах

В схеме (рис. 13.1) возможны теоретически четыре состояния:

- 1) оба транзистора открыты;
- 2) оба транзистора закрыты;
- 3) открыт VT1, VT2 – закрыт;
- 4) VT2 открыт, VT1 – закрыт.

Особенность схемы в том, что первые два состояния являются неустойчивыми.

Предположим, что оба транзистора открыты и находятся в активном режиме. Ввиду симметрии схемы должны быть равны токи коллекторов и токи базы. Неизбежны малейшие флуктуации тока. Например, увеличится чуть-чуть ток коллектора VT1 – это повлечет за собой обязательное уменьшение напряжения на этом коллекторе,

а оно вызовет уменьшение базового тока транзистора VT2, что вызывает увеличение коллекторного напряжения транзистора VT2. В свою очередь это увеличение приведет к увеличению базового тока транзистора VT1, которое вызовет увеличение степени открытия VT1, т.е. дальнейшее уменьшение коллекторного напряжения и увеличение коллекторного тока транзистора VT1. Процесс носит лавинообразный характер и будет продолжаться до тех пор, пока не прекратится действие положительной обратной связи. Это произойдет, когда транзистор VT1 войдет в режим насыщения, а транзистор VT2 – в режим отсечки. Триггерная схема (триггер) окажется в устойчивом состоянии.

Совершенно аналогично будут проходить процессы, если начнет изменяться ток транзистора VT2. Параметры схемы могут быть подобраны так, что открытый транзистор насыщен, либо находится на границе активной области и не входит в режим насыщения. В первом случае триггер называется насыщенным, во втором – ненасыщенным.

В одном из устойчивых состояний триггер может находиться как угодно долго до момента, пока не поступит сигнал от внешнего источника управляющего напряжения. Управляющее напряжение можно вводить различными способами, например, через входные диоды VD1, VD2.

Пусть транзистор VT2 – закрыт, а VT1 – открыт. Подадим открывающий импульс в цепь базы транзистора VT2. Как только появится ток коллектора VT2, транзистор VT1 выйдет из насыщения, возникнет регенеративный процесс, приводящий к опрокидыванию триггера, т.е. транзистор VT2 откроется, VT1 закроется. Конденсаторы, показанные в схеме, не изменяя сути процесса, предназначены для ускорения этого процесса.

Чтобы перевести триггер в другое устойчивое состояние, нужно подать управляющий импульс теперь на базу другого транзистора (VT1), который находится в состоянии отсечки. Процесс пройдет аналогично. Если бы вместо этого мы подали открывающий импульс вновь на транзистор уже открытый, это не изменило бы состояния триггера.

Если подать открывающие импульсы на оба транзистора, они оба могут открыться, но после снятия импульса возникнет неопределенность, так как любой из транзисторов окажется в запертом состоянии. Следовательно, такая комбинация управляющих импульсов должна быть запрещена.

У рассматриваемого триггера два информационных входа и два выхода. Они имеют специфические названия: один из выходов называют прямым и обозначают буквой Q (quit – покидать, оставлять), другой – инверсным и обозначают $\bar{Q}$, т.е. сигнал противоположен первому. Состояние триггера чаще всего отождествляют с сигналом на прямом выходе. Считается, что триггер «установлен», если $Q = 1$, ($\bar{Q} = 0$), т.е. находится в единичном состоянии.

Триггер «сброшен», «погашен», т.е. находится в нулевом состоянии, если $Q = 0$, ($\bar{Q} = 1$). Когда управляющие входы (R и S) не активны (в данном случае $R = 0$, $S = 0$), триггер находится в режиме хранения. Различают три состояния триггера: установлен, сброшен, хранение. Вход, по которому триггер устанавливается в единичное состояние, обозначают входом S (set – установка). Вход, по которому триггер устанавливается в нулевое состояние, обозначают R (reset – возврат). В нашем случае, если мы обозначили Q и $\bar{Q}$ вход S будет на схеме слева, а вход R – справа.

13.2. RS-триггеры на логических элементах

Триггерную схему, рассмотренную выше, называют *RS-триггером*. Проще всего триггер можно построить на логических элементах, соединяя их по кольцевой схеме так, что вход одного логического элемента является выходом второго, как показано на рис. 13.2.

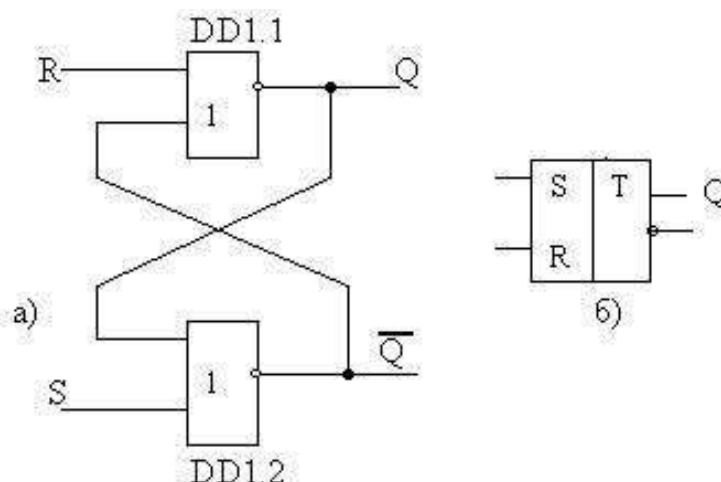


Рис. 13.2. RS-триггер на элементах ИЛИ-НЕ:

а – структурная схема, *б* – условное графическое обозначение (УГО)

Предположим, что $Q = 1, R = 0, S = 0$, тогда на входах DD1.2 есть сигналы $Q = 1, S = 0$, на выходе будет $\bar{Q} = 0$; на входах DD1.1 будут $R = 0, \bar{Q} = 0$, на выходе $Q = 1$, т.е. такое состояние будет устойчивым и поддерживать само себя.

Подадим на вход сигнал $R = 1$, тогда на выходе микросхемы DD1.1 получим $\bar{Q} = 0$, на входе DD1.2 будем иметь $Q=0, S=0$ – на выходе $\bar{Q}=1$, этот сигнал поступит на вход DD1, будем на входе иметь $R=1, \bar{Q}=1$, на выходе $Q=0$, т.е. подтверждаем новое состояние. Если теперь сделать $R=0$, положение не изменится: на выходе DD1.1 $Q=0$, на выходе DD1.2 $\bar{Q}=1$, т.е. триггер принял состояние «сброшен». Рассуждая аналогично, придем к выводу, что при подаче на вход сигнала $S=1$ триггер установится в состояние «1». Последовательность изменения состояний на выходах триггера после подачи сигналов управления на его входы можно показать на диаграммах сигналов.

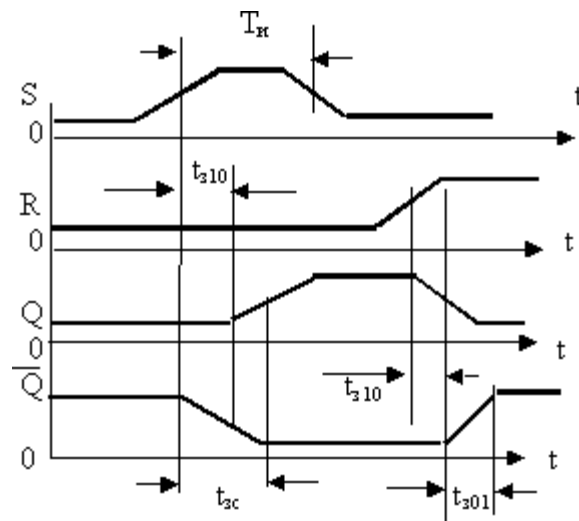


Рис. 13.3. Диаграммы сигналов RS-триггера

На рис. 13.3 обозначено:

t_{310} – время задержки переключения логического элемента DD1.2 из «1» в «0» под действием сигнала S , либо переключения логического элемента DD1.1 под действием сигнала R ;

t_{301} – время задержки переключения логического элемента DD1.1 из «0» в «1» под действием сигнала R ;

t_{3c} – среднее время перехода сигнала на выходе триггера из одного состояния в другое.

Условно считается, что действие переключающего сигнала по изменению состояния других сигналов начинается с момента достиже-

ния этим сигналом половины своего уровня. Анализируя при этих условиях диаграммы сигналов, изображенные на рис. 13.3, можно сделать следующие выводы:

1. Для надежного переключения триггера входными сигналами минимальная длительность импульса $T_{и}$ должна выбираться из условия:

$$T_{и} = 2 t_{зс}.$$

2. Учитывая разброс средних значений времени задержки и появления сигналов на входах, для предотвращения сбоев, т.е. нарушения порядка переключения, следует обеспечивать паузу между фронтами и срезами управляющих сигналов. С этой целью для триггера должно быть определено «разрешающее» время – минимальный интервал времени между моментами посылок входных импульсов:

$$T_p = 3 t_{зс}.$$

3. Максимальная частота переключения может быть определена как величина обратная разрешающему времени:

$$f_{max} = 1/ T_p = 1/ 3t_{зс}, \text{ (если } t_{зс} \text{ измерять в мкс, то } f_{max} \text{ – в МГц)}.$$

Состояние триггера обычно отражают в таблицах состояния. Для RS-триггера на логических элементах ИЛИ-НЕ эта таблица будет выглядеть так, как показано в табл. 13.1, где t , $(t+1)$ – дискретные моменты времени до и после воздействия входных сигналов; Q^n , Q^{n+1} – состояния до переключения и после него; X – неопределенное состояние. В табл. 13.1 видно, что при наличии или подаче «0» на входы R и S на выходе будет сохраняться предыдущее значение Q^n .

Таблица 13.1
Таблица состояний
RS-триггера

t		t+1
R	S	Q^{n+1}
0	0	Q^n
0	0	1
1	1	0
1	1	X

Часто можно встретить в литературе упрощенные временные диаграммы, в которых не показывают наклоны фронтов и спадов сигналов. Такие диаграммы можно использовать для определения общей картины, но для подробного анализа они мало пригодны (рис. 13.4).

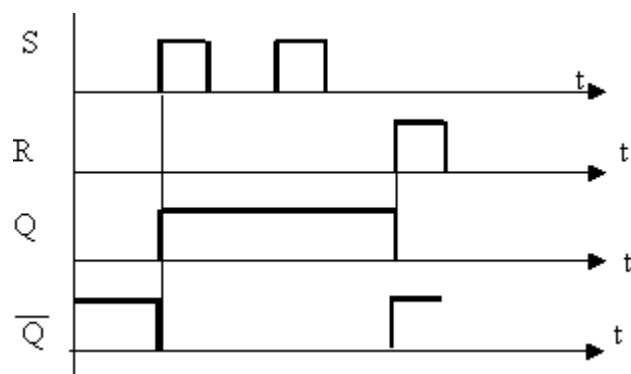


Рис. 13.4. Упрощенные временные диаграммы сигналов RS-триггера

RS-триггер может быть построен не только на логических элементах ИЛИ-НЕ, но и на элементах И-НЕ (рис. 13.5), причём управление таким триггером осуществляется логическим сигналом низкого уровня.

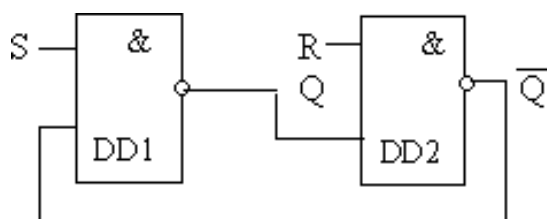


Рис. 13.5. Структурная схема RS-триггера на логических элементах И-НЕ

Состояния триггера при различных сочетаниях входных сигналов показаны в табл. 13.2. Анализ структурной схемы и таблицы показывает, что «активным», т.е. изменяющим состояние триггера логическим уровнем в рассматриваемом триггере является уровень «0».

Таблица 13.2

Таблица состояний RS-триггера на логических элементах И-НЕ

t		t+1
R	S	Q^{n+1}
1	1	Q^n
1	0	1
0	1	0
0	0	X

Упрощенные диаграммы сигналов будут выглядеть следующим образом (рис. 13.6):

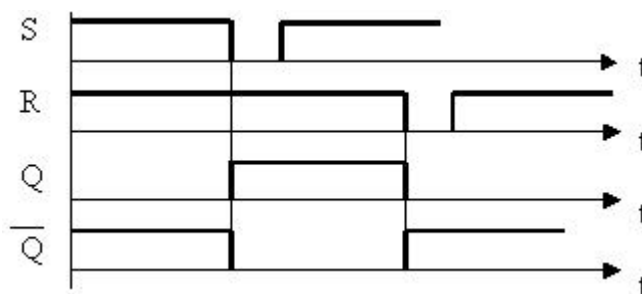


Рис. 13.6. Диаграммы сигналов RS-триггера на элементах И-НЕ

Триггеры являются схемной реализацией элементарных *цифровых автоматов*, т.е. устройств, которые можно описать с помощью конечных множеств входных сигналов $x(t)$ (входного алфавита), выходных сигналов $Y(t)$ (выходного алфавита), функций переходов F_n , конечного множества внутренних состояний $q(t)$ и функций выходов $F_{вых}$ [19]. При этом используется понятие дискретного времени t , $(t + 1)$, $(t - 1)$ и т.д., т.е. моменты текущий, последующий и предыдущий (подробнее см. п. 13.7). Если текущее состояние $Q(t)$, то $Q(t+1) = F_n [Q(t), x(t)]$, $Y(t) = F_{вых} [Q(t), x(t)]$, где: $x(t)$ – входной сигнал; $Y(t)$ – выходной сигнал.

Например, анализируя таблицы состояний рассмотренных ранее триггеров, можно записать их функции переходов:

– RS-триггер на элементах ИЛИ-НЕ: $Q(t+1) = S(t) + Q(t) R(t)$; $RS = 0$.

– RS-триггер на элементах И-НЕ: $Q(t+1) = S(t) + Q(t) R(t)$; $R + S = 1$.

Функциональное назначение RS-триггера – реализация задержки на такт или запоминание значения двоичной переменной.

Рассмотренные RS-триггеры являются *асинхронными*, т.е. такими, в которых переключения ЛЭ (логических элементов) происходят только как следствие изменения сигналов на входе. Физически после каждого переключения входного сигнала имеет место переходный процесс, состоящий в переключении связанных между собой ЛЭ, и этот процесс заканчивается переходом триггера в новое состояние, сохраняющееся до нового переключения. Поэтому можно условно принять временной интервал между двумя соседними переключениями на входе, равный условной единице ($t = 1$). Тогда к началу каждо-

го переключения условное (дискретное) время принимает целочисленные значения, для которых состояние триггера можно предсказать, так как к моменту нового переключения переходный процесс предыдущего переключения уже завершен. Этим объясняется форма записи функций переходов триггера.

Асинхронные RS-триггеры используются и как самостоятельные изделия, но чаще всего в составе более сложных триггерных схем.

Помимо асинхронных RS-триггеров очень часто используются *тактируемые (синхронизированные)* RS-триггеры. Тактируемые триггеры имеют на входе ЛЭ, входы которых соединены так, чтобы образовать вход *С-тактовый вход* (рис. 13.7).

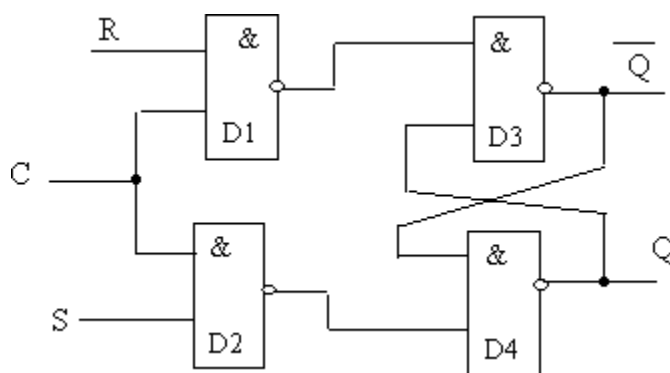


Рис. 13.7. Структурная схема тактируемого уровнем сигнала RS-триггера

Пусть $S = 1$, $C = 1$, $R = 0$, тогда должно быть. $Q = 1$, $(\overline{Q} = 0)$, так как асинхронный триггер D3, D4 устанавливается в 1 сигналом 0.

Тактируемые RS-триггеры при наличии тактового импульса действуют как асинхронные, поэтому смена сигналов на информационных входах должна происходить только в паузах между тактовыми импульсами, иначе возникнут нарушения в работе – сбои. Как отмечалось ранее, для RS-триггера есть сочетание входных сигналов, после снятия которых триггер может принять любое из двух состояний, причем это состояние заранее не определено.

13.3. Разновидности RS-триггеров

Подключая к входам RS-триггера схему управления из ЛЭ, включенных определенным образом, можно обеспечить такое положение, что при всех комбинациях входных сигналов сигналы на вы-

ходе будут иметь заведомо известные состояния. В литературе можно встретить S-триггеры, R-триггеры, Е-триггеры, как разновидности RS-триггеров. S-триггер принимает единичное состояние при запрещенной для RS-триггера комбинации; R-триггер принимает нулевое состояние; Е-триггер принимает состояние, в котором он был до подачи запрещенной комбинации. Триггер, меняющий свое состояние на противоположное после действия запрещенной для RS-триггера комбинации, относится к JK-триггерам, причем вход J соответствует входу S, а вход К – входу R. Каждый из этих триггеров может быть асинхронным либо тактируемым. Кроме того они могут быть с прямым, либо с инверсным управлением, тогда их можно обозначить как $\bar{S}$ -триггер, $\bar{R}$ -триггер, $\bar{E}$ -триггер, $\bar{J}\bar{K}$ -триггер. Сводная таблица асинхронных RS-триггеров (табл. 13.3) и структурные схемы Е и R-триггеров (рис. 13.8) представлены ниже (прямое управление триггерами).

Таблица 13.3

Сводная таблица RS-триггеров

Такт n		Такт (n+1)			
S (J)	R (K)	Тип триггера			
		S-триггер	R-триггер	E-триггер	JK-триггер
0	0	Q_n	Q_n	Q_n	Q_n
0	1	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1
1	1	1	0	Q_n	Q_n

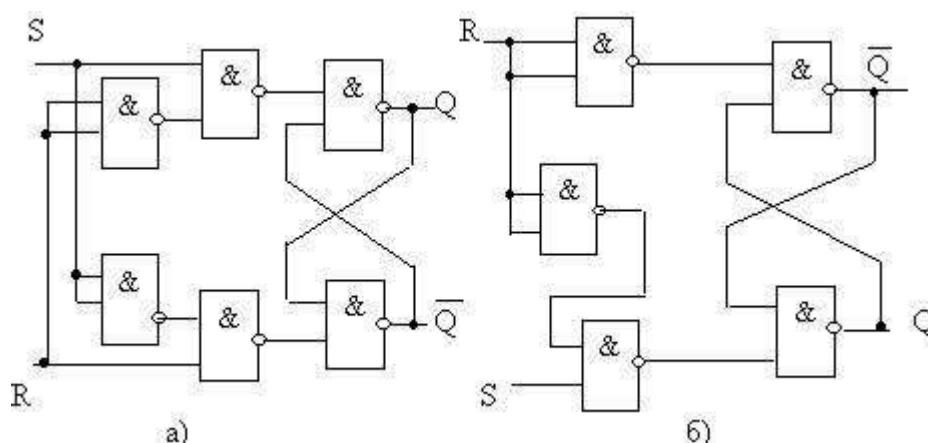


Рис. 13.8. Структурные схемы Е-триггера (а), R-триггера (б)

Двухступенчатый RS-триггер (MS-триггер). MS-триггер состоит из двух последовательно включенных синхронных RS-триггеров. Один из триггеров называют М-триггер (master – хозяин), другой S-триггер (slave – раб) (рис. 13.9).

Благодаря общему синхросигналу C вся схема функционирует как единое целое и называется двухступенчатым или MS-триггером (flip-flop). В этом триггере при $C = 1$ разрешается действие М-схемы: она действует как синхронизируемый RS-триггер, однако $\bar{C}$ обеспечивает режим хранения на выходах Q_s , $\bar{Q}_s$.

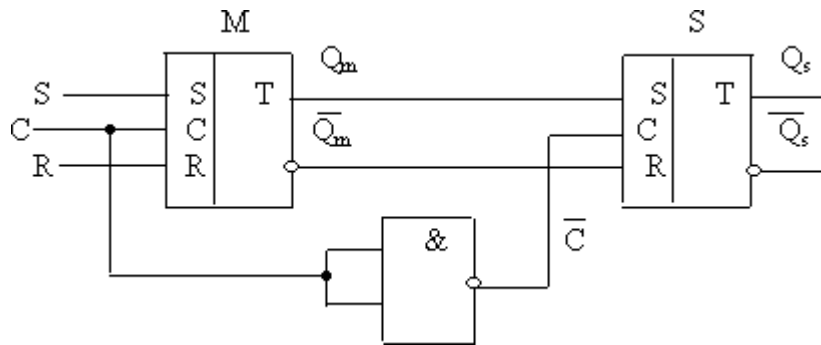


Рис. 13.9. Структурная схема MS-триггера

При $C = 0$ обеспечивается режим хранения на выходах Q_m , $\bar{Q}_m$, а вторая ступень действует как синхронизируемый RS-триггер, так как $C = 1$ и на выходах Q_s , $\bar{Q}_s$ будут устанавливаться значения, соответствующие предыдущему состоянию Q_m , $\bar{Q}_m$. Работу MS-триггера можно показать с помощью упрощенных временных диаграмм сигналов (рис. 13.10).

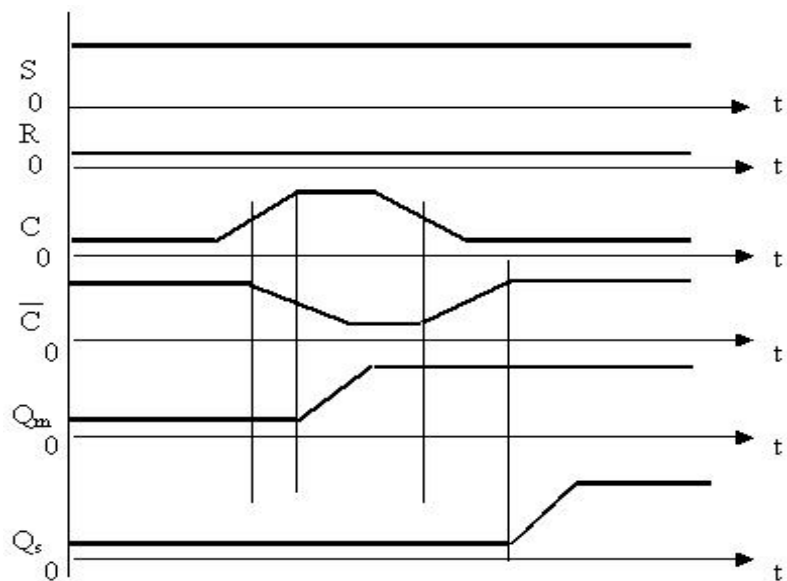


Рис. 13.10. Временные диаграммы сигналов двухступенчатого RS-триггера

На входах R и S уровни сигналов должны быть установлены заранее, а управление делается сигналом C. Анализ диаграмм (рис. 13.10) показывает, что информация, поступившая на входы R и S принимается в M-триггер, когда сигнал C изменится от 0 к 1 (по фронту). Но пока $C = 1$, эта информация не приходит в S-триггер, так как инверсией $\bar{C} = 0$ закрыты входные конъюнкторы S-схемы. Эти конъюнкторы откроются лишь тогда, когда сигнал $\bar{C} = 0$ изменится от 0 к 1, т.е. по спаду синхронного сигнала C. Только после этого информация с выхода Q_m попадет на выход Q_s , т.е. триггер меняет свое состояние по срезу C-сигнала.

Срезом C-сигнала должен предшествовать интервал подготовки, в течение которого входные сигналы на входах R и S не должны меняться. Иначе, если срез C-сигнала наложится на процесс переключения M-схемы, правильную работу гарантировать нельзя. Так как входные конъюнкторы закрываются срезом синхроимпульса, то они не пропустят никаких изменений входного сигнала после этого, т.е. управляющие сигналы можно обновлять тоже по срезу (сразу после него) синхроимпульса. Рассмотренный принцип построения двухступенчатого триггера лежит в основе принципа динамического управления триггером, при котором существенно повышается помехоустойчивость триггерной системы.

Действие рассмотренных триггеров аналитически описывается так называемыми уравнениями состояний, в которых показано, под действием каких сочетаний входных логических сигналов триггер изменяет состояние на выходе. Для несинхронизируемых триггеров эти уравнения показаны ниже:

$$\underline{RS}\text{-триггер:} \quad Q(t+1) = \underline{S}(t) + Q(t) \overline{R}(t), RS=0;$$

$$RS\text{-триггер:} \quad Q(t+1) = S(t) \pm Q(t) \underline{R}(t), R + S = 1;$$

$$IK\text{-триггер:} \quad Q(t+1) = I(t) Q(t) + K(t) \overline{Q}(t).$$

Рассмотрев основные принципы построения триггеров можем сделать классификацию триггеров. Триггеры классифицируют по способу записи информации и функциональному признаку. По способу записи различают *тактируемые* (синхронизируемые) и *асинхронные* (несинхронизируемые) триггеры. У асинхронного триггера изменение его состояния происходит непосредственно с приходом управляющего сигнала. В синхронизируемых триггерах кроме информационных входов имеются так называемые *входы синхронизации* (*тактовые входы*). Изменение состояния тактируемого триггера при наличии на входах информационных сигналов может произойти

только после подачи на тактовые входы соответствующих разрешающих сигналов. Причем разрешающий сигнал может быть подан либо в виде потенциала (статическое управление), либо в виде перепада (динамическое управление). Классификация триггеров по функциональному признаку представлена на рис. 13.11:

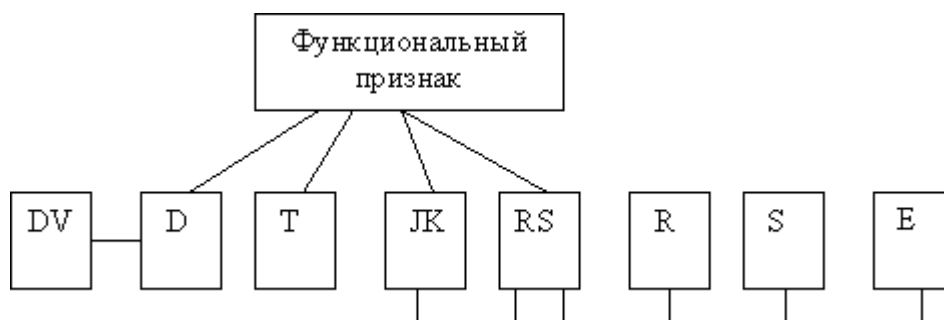


Рис. 13.11. Классификация триггеров

Основой классификации по функциональному признаку является способ организации логических связей между входами и выходами в определенные (дискретные) моменты времени (t , $t+1$, $t-1$). Название триггера отражает особенности его управления и характеризует вид логического уравнения (уравнение состояния), описывающего его функционирование при подаче соответствующих сигналов.

Ввиду разнообразия различных видов триггеров общеприняты обозначения входов и выходов триггеров, которые применяются в основных видах УГО (условных графических обозначений). Ранее было отмечено, что состояние триггера отождествляют с сигналом на его прямом выходе: триггер находится в единичном состоянии (установлен) при $Q = 1$ ($\overline{Q} = 0$) и в нулевом состоянии («сброшен»), если $Q = 0$ ($\overline{Q} = 1$). Входы имеют следующие обозначения:

S – вход для раздельной установки триггера в состояние 1;

R – вход для раздельной установки триггера в состояние 0;

J – вход для установки триггера в состояние 1;

K – вход для сброса этого триггера;

T – счетный вход;

D – информационный вход для установки или сброса триггера;

C – тактовый вход;

E – дополнительный управляющий вход для разрешения приема информации (ранее был V-вход согласно ГОСТ2743-72, отсюда остались названия DV, TV-триггеры).

Срабатывание по фронту либо по спаду импульса отмечается знаками:

- срабатывание по фронту (перепаду от 0 к 1, );
- срабатывание по спаду (перепаду от 1 к 0, .

Если триггер управляется инверсным сигналом (логическим нулем), то это показывается кружком, располагаемым на конце входного вывода.

Если требуется указать инверсный выход, то кружок ставят в начале выходного вывода: вход – ,  – выход.

Выходы всегда указываются с правой стороны прямоугольника, изображающего триггер (рис. 13.12).

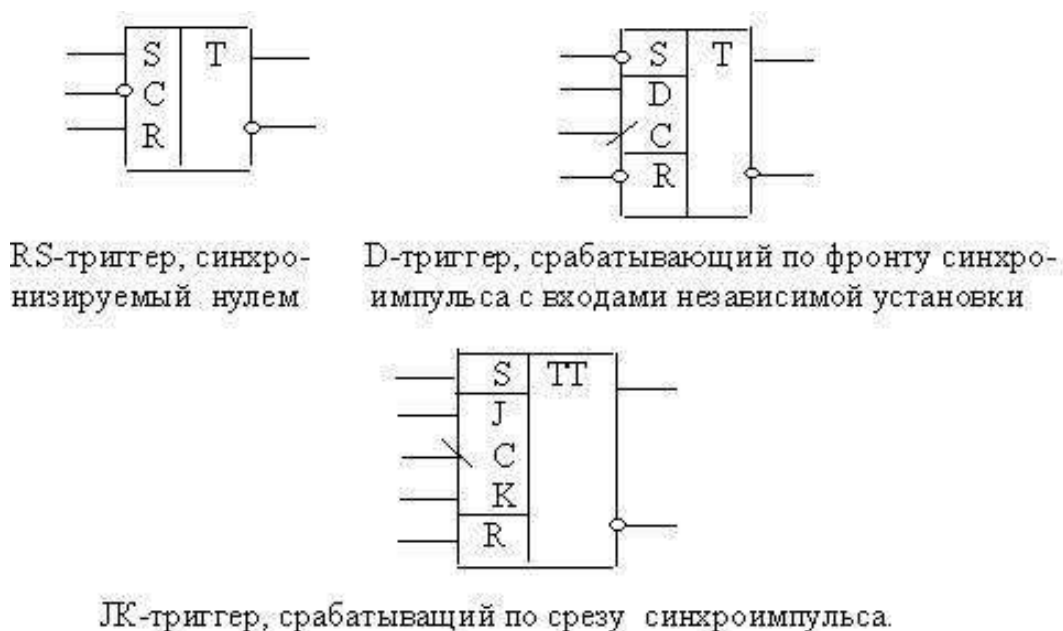


Рис. 13.12. Примеры УГО триггеров

13.4. JK-триггеры

JK-триггер носит название универсального триггера, так как используется во многих устройствах (регистры, счетчики, делители частоты и т.п.) чаще других за счет того, что легко преобразуется в триггеры других видов.

JK-триггер с потенциальным (статическим) управлением может быть построен на базе RS-триггера (рис. 13.13) путем введения дополнительных элементов и цепей обратной связи.

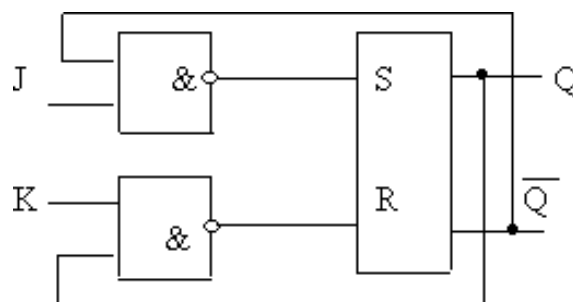


Рис. 13.13. Структурная схема JK-триггера со статическим управлением

Функция переходов (уравнение состояния) имеет вид:

$$Q(t+1) = J(t) Q(t) + K(t) Q(t).$$

JK-триггеры обычно выполняются синхронными и двухступенчатыми, что расширяет их возможности и повышает помехоустойчивость. Логическая структура двухступенчатого JK-триггера представлена на рис. 13.14. Эта структура отличается от рассмотренной ранее двухступенчатой структуры RS-триггера наличием обратных связей с выхода на вход.

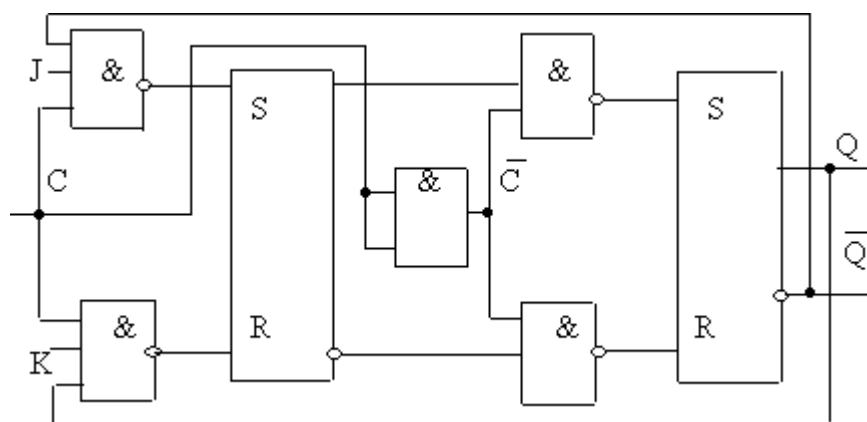


Рис. 13.14. Структурная схема двухступенчатого JK-триггера, срабатывающего по спаду синхроимпульса

Можно видеть, что схема отличается от MS-триггера наличием цепей обратной связи и трехходовыми элементами И в первой ступени (в М-схеме). При любом состоянии триггера сигналы обратной связи открывают для С-сигнала (при $J = K = 1$) именно тот конъюнктор, пройдя через который С-сигнал переведет триггер в противоположное состояние. Данные о функционировании JK-триггера приведены в табл. 13.4.

Таблица 13.4

Таблица функционирования JK-триггера

С	J	K	Q (t+1)	Режим
X	0	0	Q(t)	Хранение
↓	0	1	0	Сброс
↓	1	0	1	Установка
↓	1	1	Q(t)	Счетный

Главное условие правильной работы остается прежним: во время изменения синхросигнала не должны меняться сигналы на информационных входах J, K.

13.5. D-триггер и Т-триггер

D-триггер. D-триггер имеет один информационный вход; сигнал на выходе D-триггера повторяет сигнал на входе D, существовавший в предыдущем такте, т.е. D-триггер «запоминает» этот сигнал до следующего такта. Функция переходов имеет вид:

$$Q(t+1) = D(t).$$

Можно сказать, что D-триггер задерживает на один такт информацию, существовавшую на входе D. D-триггеры выполняются тактируемыми. Логическая структура D-триггера со статическим управлением, построенного на базе RS-триггера с тактированием потенциалом (уровнем) синхронизирующего сигнала, представлена на рис. 13.15.

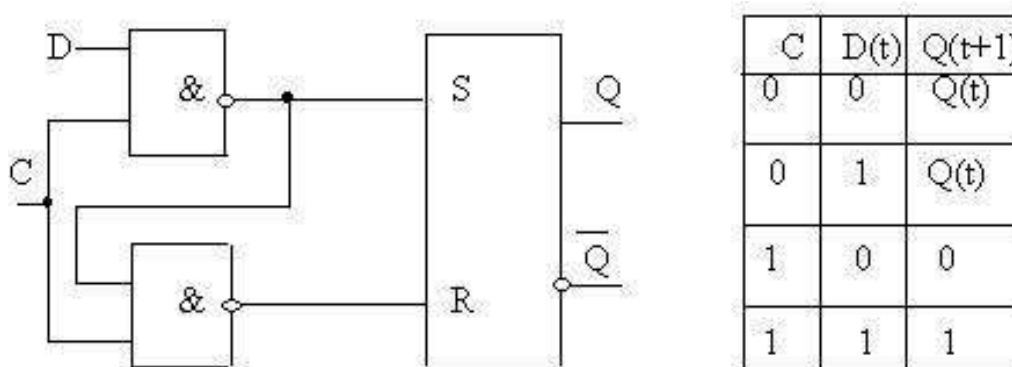


Рис. 13.15. Структурная схема и таблица функционирования D-триггера с потенциальным управлением

Принцип действия рассматриваемого D-триггера поясняется диаграммами сигналов, приведенными на рис. 13.16.

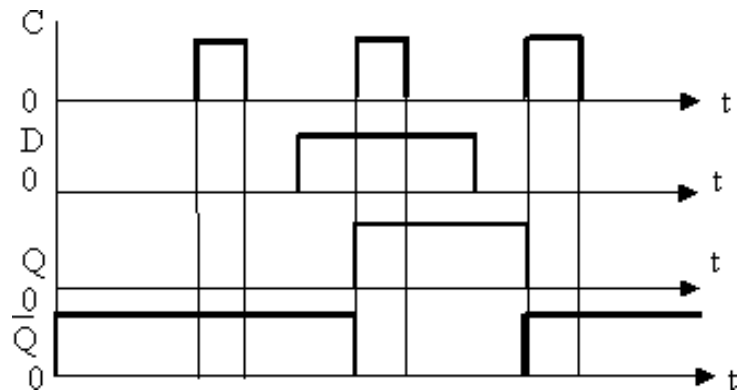


Рис. 13.16. Диаграммы сигналов D-триггера

Из диаграмм видно, что D-триггер осуществляет «задержку» появления, (исчезновения) импульса на выходе на промежутки времени между фронтом импульса и фронтом (спадом) сигнала на D-входе.

D-триггер, как и любой другой, может быть построен не только на элементах И-НЕ, но и на других: ИЛИ-НЕ, И-ИЛИ-НЕ. При этом удастся совместить функции триггерной ячейки и комбинационной логической схемы. Примером может служить DV-триггер на элементах И-ИЛИ-НЕ (рис. 13.17).

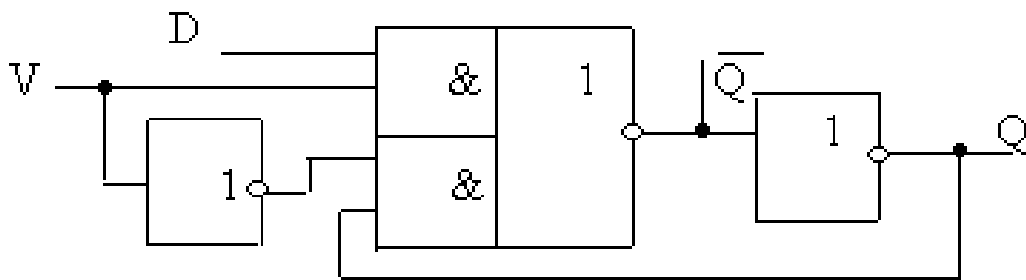


Рис. 13.17. Структурная схема DV-триггера

Характеристическое уравнение для DV-триггера имеет вид:

$$Q(t+1) = V(t) D(t) + \bar{V}(t) Q(t).$$

DV-триггер позволяет получить: при $V = 1$ $Q(t+1) = D(t)$;
 при $V = 0$ $Q(t+1) = Q(t)$.

Лучшими функциональными характеристиками обладает D-триггер с динамическим управлением, так называемый шестиэлементный триггер (триггер Вебба) (рис. 13.18) [22].

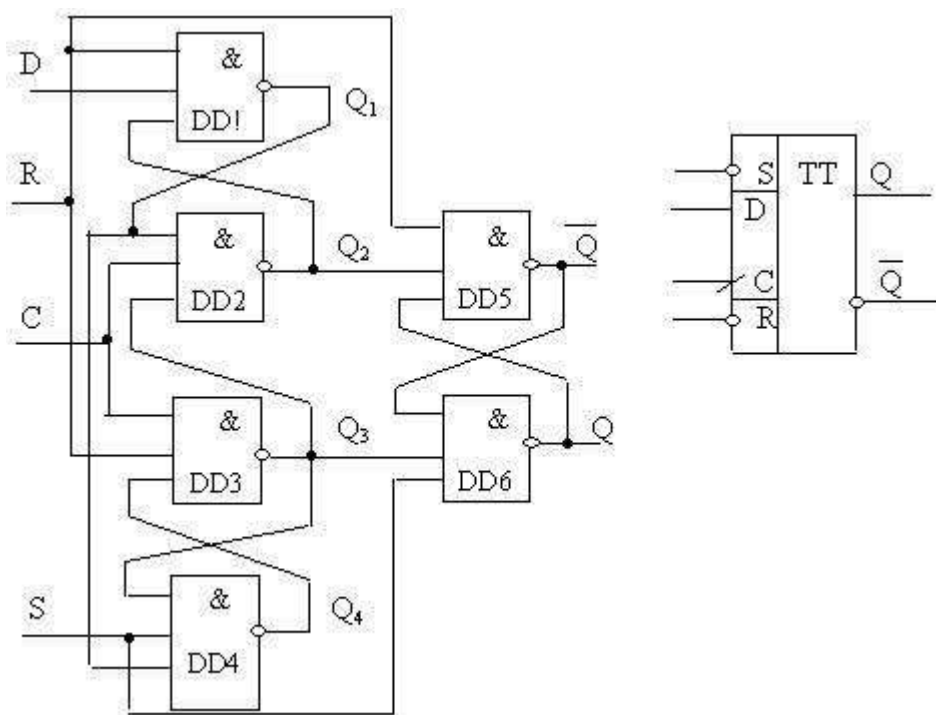


Рис. 13.18. Структурная схема и УГО шестиэлементного D-триггера

В структуре (рис. 13.18) имеются шесть элементов И-НЕ, образующих попарно три элементарных триггера. Дополнительные входы асинхронного управления R, S действуют независимо от D-входа и служат для асинхронной установки или сброса триггера.

Если $C=0$, на выходе $Q_2 = Q_3 = 1$ и триггер DD5, DD6 находится в режиме хранения $Q = Q(t)$. Состояние элементов DD1 и DD4 определяется сигналами $D(t)$: если $D = 0$, то $Q_1 = 1$, $Q_4 = Q_3 \cdot Q_1 = 0$; если $D = 1$, то $Q_1 = Q_2 \cdot D = 0$, $Q_4 = 1$.

Если $C = 0$, а сигнал на входе D изменится, то это отразится лишь на состоянии Q_1 , Q_4 , но на выходах схемы это не отразится.

С приходом сигнала $C = 1$ (при изменении от 0 до 1) возникает такая комбинация сигналов Q_2 , Q_3 , которая приводит выходную триггерную ячейку в состояние, которое было на входе $D(t)$. УГО триггера отражает тот факт, что «активным» уровнем для входов R, S является низкий логический уровень входного сигнала.

Режимы работы триггера отражены в таблице состояний (табл. 13.5).

D-триггеры очень часто используются в различных схемах: регистрах, счетчиках. Это объясняется тем, что D-триггеры позволяют построить схемы с малой вероятностью ложных срабатываний.

Таблица 13.5

Таблица состояний шестиэлементного D-триггера

Операция	Вход				Выход	Режим
	S	R	C	D(t)	Q(t+1)	
Загрузка 0 Загрузка 1	1 1	1 1	↑	0 1	0 1	Синхронный
Хранение Хранение Хранение	1 1 1	1 1 1	↓ 0 1	X X X	Q(t) Q(t) Q(t)	
Установка 1 Установка 0	0 1	1 0	X X	X X	1 0	Асинхронный

Т-триггер. Т-триггер – это логическая схема с двумя устойчивыми состояниями и одним информационным входом, изменяющая свое состояние на противоположное всякий раз, когда на вход Т поступает управляющий сигнал.

Т-триггер – единственный вид триггера, состояние которого в текущий период определяется собственным состоянием в предыдущем периоде. Самостоятельных Т-триггеров не выпускают. Основной способ построения Т-триггеров – введение соответствующих обратных связей в тактируемых – RS, JK, D-триггерах.

Т-триггер называют также *счетным триггером* (триггером со счетным входом). Его применяют в основном для счета входных импульсов и деления частоты этих импульсов. Применение Т-триггеров в счетчиках обусловлено тем, что каждому входному импульсу соответствует одно срабатывание, т.е. число срабатываний триггера соответствует числу импульсов.

Деление частоты Т-триггером следует из принципа его действия. Каждому периоду изменения входного сигнала соответствует половина периода на выходе (двум периодам соответствует один), т.е. частота выходного сигнала оказывается в два раза ниже частоты входного. Импульсы на выходе Т-триггера имеют равные длительность паузы и ширину импульса независимо от скважности входного

периодического сигнала. Последовательность таких импульсов называют *меандром*. Диаграммы сигналов и таблица состояний Т-триггера показаны на рис. 13.19.

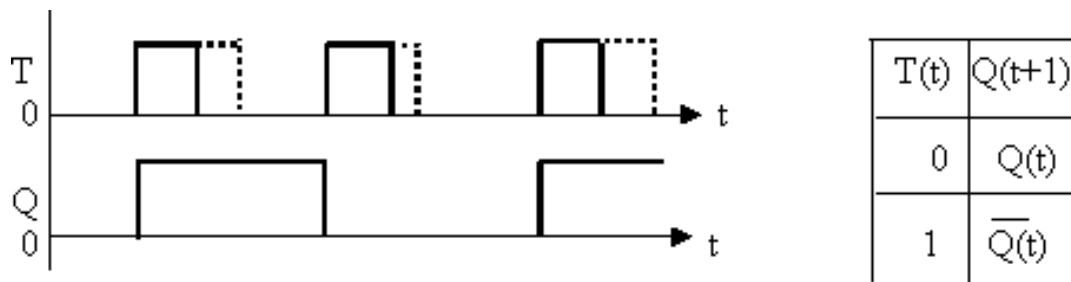


Рис. 13.19. Диаграммы сигналов и таблица состояний Т-триггера

Уравнение состояний (функция переходов) Т-триггера имеет вид:

$$Q(t+1) = \overline{T(t)} \cdot Q(t) + T(t) \cdot \overline{Q(t)} = T(t) \otimes Q(t),$$

где знак $\otimes$ обозначает функцию ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

Имея функцию переходов, можно определить способы получения Т-триггеров из других. Например, если в уравнении состояний JK-триггера положить $J=K$, то получим уравнение, идентичное уравнению Т-триггера. На практике это означает, что если соединить между собой входы J и K и подавать на них импульсы, JK-триггер будет выполнять функцию Т-триггера.

13.6. Несимметричные триггеры

Такие триггеры часто называют триггерами Шмитта [1]. По своим свойствам они существенно отличаются от симметричных триггеров, так как у них нет «памяти» о предыдущем состоянии.

Несимметричный триггер – это регенеративное устройство, имеющее гистерезисную передаточную характеристику, у которого выходной сигнал может принимать два значения.

Переход от одного уровня выходного напряжения к другому происходит скачкообразно при определенном значении входного сигнала – напряжении срабатывания $U_{ср\text{аб}}$. Возвращение в исходное состояние происходит при другом уровне входного сигнала – напряжении отпущения $U_{отп}$ (рис. 13.20).

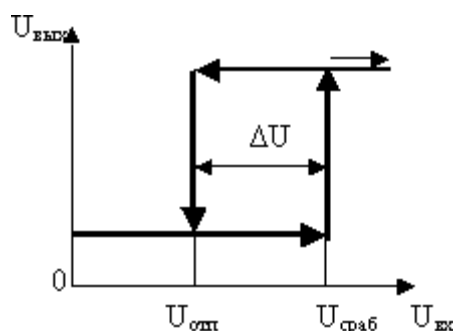


Рис. 13.20. Амплитудная характеристика триггера Шмитта

Характеристика имеет вид гистерезисной петли с шириной ΔU .

Триггер Шмитта используется для формирования резких перепадов напряжения из медленно меняющихся входных сигналов. Принцип действия триггера Шмитта поясняется схемой, составленной из дискретных элементов (рис. 13.21).

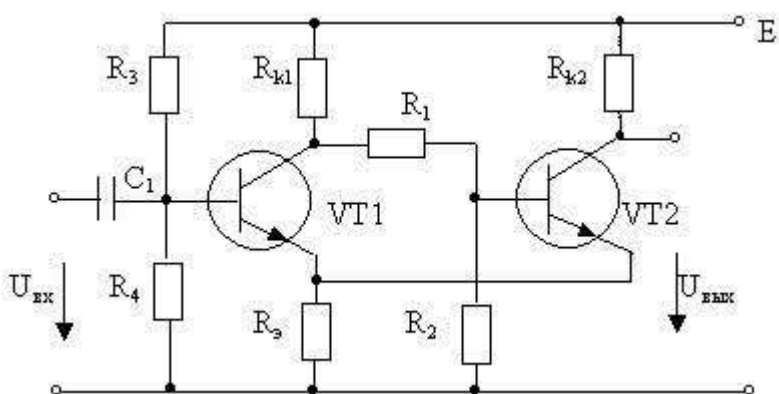


Рис. 13.21. Схема триггера Шмитта на биполярных транзисторах

Работа схемы происходит следующим образом.

Пусть транзистор VT2 открыт при $U_{вх} = 0$ и насыщен. Ток, протекающий в цепи $E - R_{к2} - R_3$ создает падение напряжения на резисторе R_3 , препятствующее открыванию транзистора VT1. При этом в исходном состоянии VT1 будет находиться в состоянии отсечки, если управляющее напряжение $U_{бэ1}$ меньше порогового напряжения открытия $U_{пор}$ для данного транзистора. При подаче входного напряжения VT1 открывается в тот момент, когда $U_{бэ1} = U_{пор}$, потенциал его коллектора понижается, следовательно понижается потенциал и ток базы VT2. Транзистор VT2 из режима насыщения начнет переходить в активный режим, т.е. ток через него понижается, что приводит к уменьшению падения напряжения на резисторе R_3 . Послед-

нее увеличивает ток через VT1 и еще более снижает потенциал его коллектора, что ведет к переходу его из активной области в режим насыщения. Процесс идет лавинообразно. В результате транзистор VT2 переходит в область отсечки, а транзистор VT1 – в область насыщения. Напряжение, при котором происходит переключение, называется напряжением срабатывания. Дальнейшее увеличение входного напряжения только увеличивает глубину насыщения транзистора VT1. Если уменьшить входное напряжение, то возврат схемы в исходное положение будет при меньшем входном напряжении. Схема представляет собой двухкаскадный усилитель, охваченный слабой положительной обратной связью. Параметры элементов схемы выбирают так, чтобы ток насыщения транзистора VT2 был больше тока насыщения транзистора VT1. Это условие выполняется, если

$$E/(R_{k2} + R_{\varepsilon}) > E/(R_{k1} + R_{\varepsilon}); R_{k1} > R_{k2}.$$

Различие в уровнях срабатывания и отпускания является необходимым условием работы схемы в триггерном режиме. Логические элементы со свойствами триггера Шмитта имеют внутреннюю ПОС, глубина которой подобрана так, чтобы получить передаточную характеристику со значительным гистерезисом. Триггеры Шмитта в интегральном исполнении широко используются во входных цепях электронных средств.

Триггер Шмитта на основе операционного усилителя (ОУ). Достоинство триггера Шмитта на основе ОУ – возможность получения заданных стабильных уровней напряжений срабатывания и отпускания и возможность регулирования ширины петли гистерезиса. Уровень входного сигнала срабатывания определяется опорным напряжением, которое можно регулировать в широких пределах. Одна из схем показана на рис. 13.22.

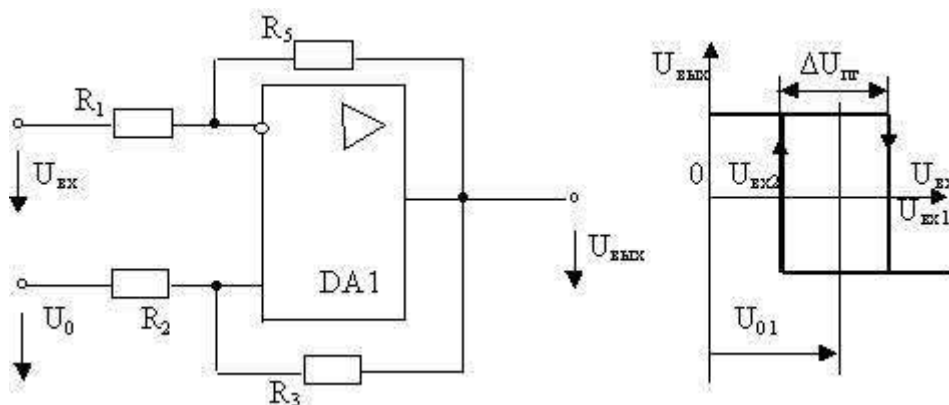


Рис. 13.22. Схема триггера Шмитта на основе ОУ и его амплитудная (выходная) характеристика

Триггер представляет собой ОУ, охваченный ПОС (положительной обратной связью) с помощью резисторов R_2 и R_3 . Коэффициент ПОС:

$$\gamma = R_2 / (R_2 + R_3).$$

Известно, что усилитель, охваченный ПОС, переходит в генераторный режим или становится регенеративным устройством, если $K\gamma \geq 1$, где K – собственный коэффициент усиления ОУ.

Если $R_2 / (R_2 + R_3) > 1/K$, то устройство будет обладать регенеративными свойствами и выходная характеристика будет иметь вид релейной, т.е. имеет скачкообразный характер. Смещение центра петли гистерезиса:

$$U_{01} = U_0 \cdot R_3 / (R_2 + R_3).$$

Ширина петли гистерезиса $\Delta U_{nz} = (U_{+m} + |U_{-m}|) \cdot (\gamma - 1/K)$, где U_{+m} – максимальное положительное выходное напряжение ОУ; $|U_{-m}|$ – модуль максимального отрицательного выходного напряжения ОУ.

13.7. Цифровые автоматы

В электронных системах и устройствах управления различными объектами широкое применение находят функциональные узлы, называемые цифровыми автоматами (ЦА) [2].

В общем случае цифровым автоматом называют цифровое устройство с памятью, предназначенное для преобразования входной цифровой информации в выходные сигналы управления различными объектами.

Поведение цифрового автомата определяется:

- множеством входных сигналов $X = (x_1, x_2, \dots, x_l)$;
- множеством выходных сигналов $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$;
- множеством внутренних состояний $Z = (z_1, z_2, \dots, z_s)$;
- начальным состоянием $z_i^{(t=0)} \in Z$;
- функцией переходов $z^{(t+1)} = f(z^{(t)}; x^{(t)})$;
- функцией выходов: $y^{(t)} = \phi(z^{(t)}; x^{(t)})$ – для ЦА Мили;
 $y^{(t)} = \phi(z^{(t)})$ – для ЦА Мура.

Разница между автоматами Мили и Мура состоит в разной форме зависимости функций выходов: в автоматах Мили функция выходов зависит от входных сигналов и внутреннего состояния, а в автоматах Мура функция выходов однозначно определяется его внутренним состоянием.

Функционирование ЦА может быть представлено в виде:

- словесного (текстового описания);
- таблиц переходов и выходов;
- графа функционирования.

Структурно ЦА может быть представлен в виде трех функциональных устройств (рис. 13.23).

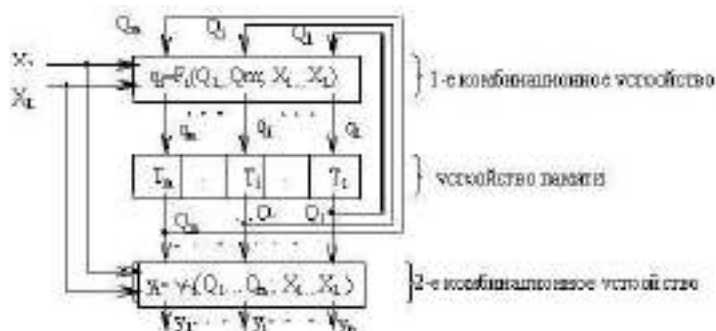
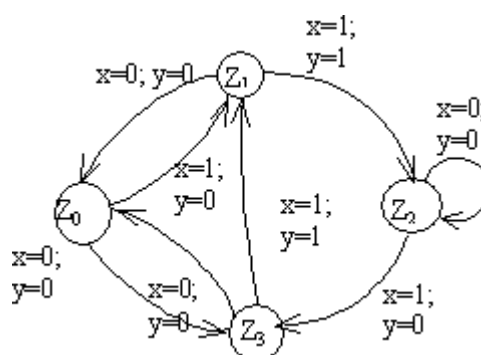


Рис. 13.23. Структурная схема ЦА Мили

Как следует из структурной схемы, первое комбинационное устройство формирует сигналы управления памятью, а второе комбинационное устройство вырабатывает выходные сигналы Y . ЦА содержит t триггеров, поэтому может иметь 2^m состояний, соответствующих t -разрядному двоичному слову. Разрядность n выходного слова Y может отличаться от значения t .

Синтез цифрового автомата. Выполнение этапов синтеза ЦА показано на примере гипотетического ЦА Мили, функционирование которого задано графом и таблицей переходов (выходов): $(z)/(y)$ (рис. 13.24).



Входные сигналы	Состояния ЦА			
	z_0	z_1	z_2	z_3
$x_1(x = 0)$	$z_3/0$	$z_0/0$	$z_2/0$	$z_0/0$
$x_2(x = 1)$	$z_1/0$	$z_2/1$	$z_3/0$	$z_1/1$

Рис. 13.24. Граф и таблица переходов ЦА

Этапы синтеза ЦА:

1. Определяем структуру памяти ЦА – число и тип триггеров. Число триггеров m зависит от числа состояний ЦА S и в данном примере равно $m = \lceil \log_2 S \rceil = \lceil \log_2 4 \rceil = 2$. В качестве триггеров выбираем JK-триггеры.

2. Производим кодирование S состояний ЦА состояниями JK-триггеров (табл. 13.7).

Таблица 13.7

Кодирование состояний ЦА

Состояние ЦА – Z	Z ₀	Z ₁	Z ₂	Z ₃
Состояние триггера T ₀ (Q ₀)	0	1	0	1
Состояние триггера T ₁ (Q ₁)	0	0	1	1

3. Составляем таблицу функционирования ЦА, учитывающую функцию переходов $z^{(t+1)} = f(z^{(t)}; x^{(t)})$, функцию выходов $y^{(t)} = \phi(z^{(t)}; x^{(t)})$ и тип триггеров-JK (табл. 13.8).

Таблица 13.8

Таблица функционирования ЦА

Входной сигнал	Предыдущее состояние ЦА			Новое состояние ЦА			Сигналы управления триггерами				Выходной сигнал
x	Z ^(t)	Q ₁ ^(t)	Q ₀ ^(t)	Z ^(t+1)	Q ₁ ^(t+1)	Q ₀ ^(t+1)	J ₁	K ₁	J ₀	K ₀	y ^(t)
0	Z ₀	0	0	Z ₃	1	1	1	*	1	*	0
0	Z ₁	0	1	Z ₀	0	0	0	*	*	1	0
0	Z ₂	1	0	Z ₂	1	0	*	0	0	*	0
0	Z ₃	1	1	Z ₀	0	0	*	1	*	1	0
1	Z ₀	0	0	Z ₁	0	1	0	*	1	*	0
1	Z ₁	0	1	Z ₂	1	0	1	*	*	1	1
1	Z ₂	1	0	Z ₃	1	1	*	0	1	*	0
1	Z ₃	1	1	Z ₁	0	1	*	1	*	0	1

4. Пользуясь данными таблицы функционирования с помощью карт Карно (рис. 13.25) определяем минимизированные ЛФ (логические функции) для построения схем комбинационных устройств, формирующих сигналы управления триггерами J₁, K₁, J₀, K₀ и выходной сигнал Y:

$$\begin{aligned}
 J_1 &= \overline{x} \cdot \overline{Q_0} + x \cdot Q_0; & K_1 &= Q_0; \\
 J_0 &= \overline{Q_1} + x; & K_0 &= \overline{Q_1} + \overline{x}; \\
 Y &= Q_0 \cdot x.
 \end{aligned}$$

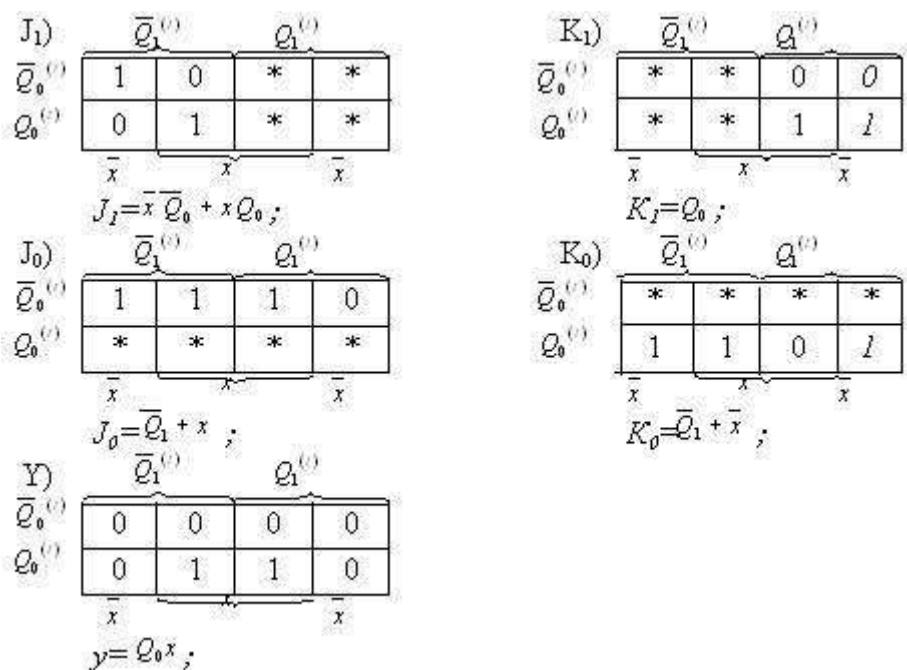


Рис. 13.25. Карты Карно и минимизированные логические функции для управляющих входов и выхода ЦА

5. На основании полученных ЛФ строим логическую схему ЦА (рис. 13.26).

Следует заметить, что схема синтезируемого ЦА может быть построена на триггерах любого типа, поэтому критерии выбора типа триггеров могут быть самыми разными, зависящими от конкретных условий. Можно, например, исходить из условия минимального количества логических элементов в комбинационной части ЦА и т.п.

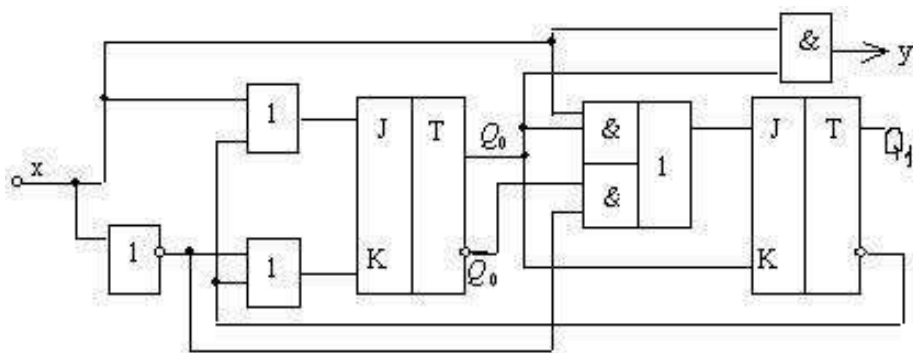


Рис. 13.26. Логическая схема синтезируемого ЦА

Пользуясь данными таблицы функционирования, получим, например, ЛФ для комбинационной части при реализации ЦА на D-триггерах, для чего составим карты Карно для сигналов управления D-триггерами D_0 и D_1 (рис. 13.27).

D_0)

	$\overline{Q_1}^{(t)}$		$Q_1^{(t)}$	
$\overline{Q_0}^{(t)}$	1	1	1	0
$Q_0^{(t)}$	0	0	1	0
	$\overline{x}$	x	$\overline{x}$	

$D_0 = \overline{Q_1}\overline{Q_0} + xQ_1;$

D_1)

	$\overline{Q_1}^{(t)}$		$Q_1^{(t)}$	
$\overline{Q_0}^{(t)}$	1	0	1	1
$Q_0^{(t)}$	0	1	0	0
	$\overline{x}$	x	$\overline{x}$	

$D_1 = \overline{Q_1}Q_0x + Q_1\overline{Q_0} + x\overline{Q_0}$

Рис. 13.27. Карты Карно и логические функции для D-входов ЦА

Подсчёт по полученным ЛФ сложности реализации логических схем управления триггерами даёт для реализации:

- а) на JK-триггерах требуется шесть элементов на 13 входов;
- б) на D-триггерах потребуется другое количество элементов.

На основании сравнения выбранных критериев сложности реализации синтезируемых схем можно, например, сделать вывод о предпочтительности выбора того или иного вида триггера или набора логических элементов.

14. РЕГИСТРЫ И СЧЁТЧИКИ

14.1. Общие сведения о регистрах

Регистр – это функциональный узел, предназначенный для записи, обработки и хранения цифровых слов. Над словами выполняются следующие операции: приём, выдача, хранение, сдвиг, поразрядные логические операции.

Главным классификационным признаком для регистров является способ приёма и выдачи данных. По этому признаку различают регистры *параллельные* (статические), *последовательные* (регистры сдвига) и *параллельно-последовательные* (универсальные). В параллельных регистрах приём и выдача слов производятся по всем разрядам одновременно. В последовательных регистрах слова принимаются и выдаются разряд за разрядом. Эти регистры называют *сдвигающими*, так как в них под действием тактирующих импульсов слова перемещаются в разрядной сетке с шагом в один разряд.

Параллельно-последовательные регистры имеют одновременно как последовательные так и параллельные входы и (или) выходы. Существуют варианты с возможностью любого сочетания способов приёма и выдачи слов.

Структурно любой регистр представляет собой несколько триггеров (по числу разрядов обрабатываемых слов), объединённых общими цепями тактирования (синхронизации), сброса и установки, разрешения приёма (записи) или выдачи (чтения) слов. Важнейшие характеристики регистров – *разрядность* и *быстродействие*. Разрядность определяется количеством триггеров для хранения слов, быстродействие характеризуется максимальной тактовой частотой, с которой может производиться запись, чтение или сдвиг информации. Для построения регистров используются D-триггеры, JK и RS-триггеры. Однако в современной схемотехнике, согласно [20], характерно построение регистров именно на D-триггерах, преимущественно с динамическим управлением. Достоинство регистров на D-триггерах состоит в существенном уменьшении числа соединений в узле, кроме того D-триггер повышает устойчивость регистра к помехам.

Пример структурной схемы статического (параллельного) регистра показан на рис. 14.1.

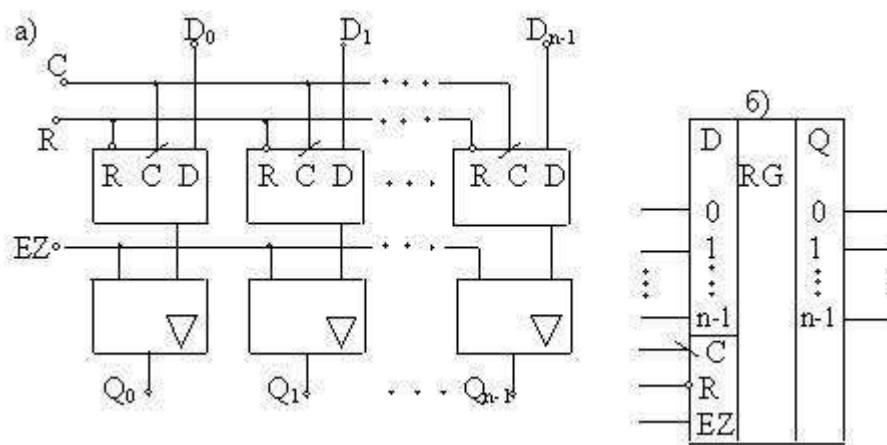


Рис. 14.1. Структурная схема (а) и условное изображение статического n -разрядного регистра (б)

В структурной схеме приняты следующие обозначения:

C – вход сигнала тактирования;

R – вход сигнала сброса («очистки») – установка логического нуля во всех разрядах выходного слова;

$D_0.....D_{n-1}$ – n -разрядное слово, подаваемое на входы данных D;

EZ – вход разрешения третьего состояния на выходе;

$Q_0.....Q_{n-1}$ – n -разрядное слово, образованное на выходах Q.

Режимы работы регистра (рис. 14.1) определяются совокупностью трех управляющих сигналов: «тактирование» – С, «сброс (очистка)» – R, «третье состояние на выходе» – EZ в соответствии с таблицей функционирования (табл. 14.1).

Таблица 14.1

Таблица функционирования регистра

Режим работы	Управляющие сигналы			Выходные сигналы
	C	R	EZ	
Очистка	1	0	1	$Q_0 \dots Q_{n-1}$
Запись		1	1	$Q_0 \dots Q_{n-1}$
Хранение	1	1	1	$Q_0 \dots Q_{n-1}$
Чтение		1	0	$D_0 \dots D_{n-1}$

По принципу хранения информации регистры делят на *статические* и *динамические*. С этой точки зрения статические регистры – это регистры, которые строят на триггерах, способных хранить информацию сколь угодно долго (конечно, при наличии напряжения питания).

Динамические регистры строят на таких элементах памяти, как конденсатор, причем в качестве конденсатора обычно используется входная ёмкость МОП-транзистора. Подобный элемент памяти может хранить информацию лишь в течение небольшого промежутка времени (несколько мс), поэтому в динамических регистрах записанная информация требует постоянной *регенерации*.

Из статических регистров можно составить блоки, называемые регистровыми файлами. Регистровые файлы позволяют хранить несколько многоразрядных слов с возможностью независимой и одновременной записи одного слова и чтения другого. Схема управления регистровым файлом позволяет легко наращивать размерность регистровой памяти, составляя блоки памяти из нескольких микросхем. Пример схемы регистрового файла показан на рис. 14.2 [20].

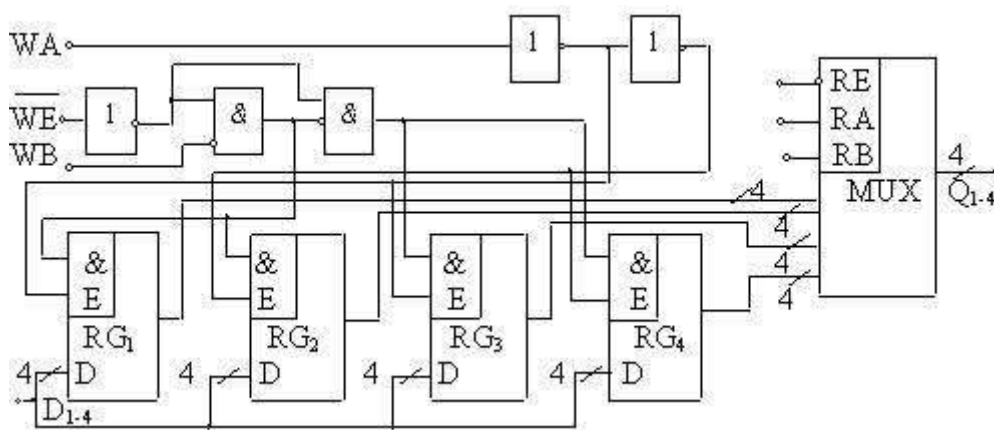


Рис. 14.2. Структурная схема четырёхразрядного регистрового файла

14.2. Сдвиговые регистры

Сдвиговый регистр – это устройство, состоящее из нескольких триггеров, соединенных между собой определенным образом и предназначенное для обработки и кратковременного хранения цифровой информации.

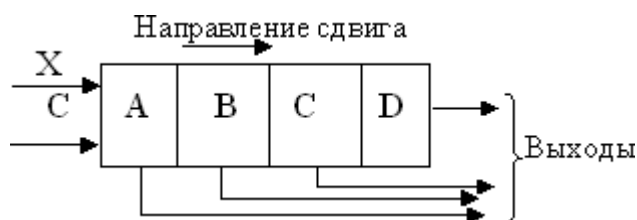


Рис. 14.3. Иллюстрация действия сдвигового регистра

Принцип действия сдвигового регистра можно представить следующим образом [5]. Пусть имеется, например, четыре триггерных ячейки, соединенных между собой последовательно (рис. 14.3). На вход первой ячейки будем подавать двоичную информацию X, считая, что триггеры тактируются тактовыми импульсами C. Символы A, B, C, D представляют триггеры регистра. Соединения внутри выполнены так, что после каждого тактового импульса каждый триггер фиксирует информацию предыдущего триггера.

Составим таблицу состояний на выходах триггеров при поступлении на вход X (рис. 14.3) двоичной информации. Примем для определенности, что до подачи тактовых импульсов исходное состояние триггеров было A=0, B=0, C=0, D=0 (табл. 14.2).

Таблица 14.2
Таблица состояний регистра

№ такта	X	A	B	C	D
-	-	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0
2	0	0	1	0	0
3	1	1	0	1	0
4	1	1	1	0	1

Регистры сдвига могут быть построены на триггерах разного вида, но наиболее распространены регистры на JK и D-триггерах. Структурные схемы таких регистров показаны на рис. 14.4, 14.5.

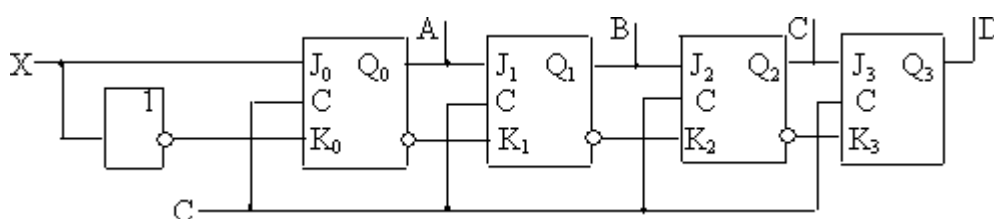


Рис. 14.4. Структурная схема сдвигового регистра на JK-триггерах

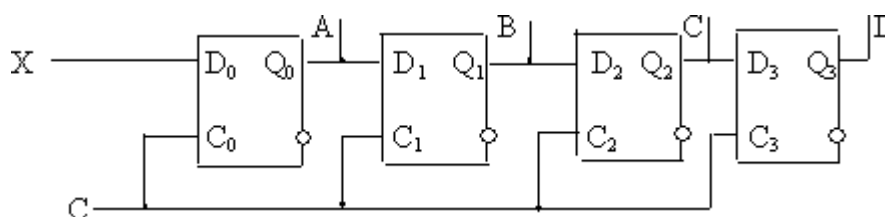


Рис. 14.5. Структурная схема сдвигового регистра на D-триггерах

В показанных схемах используется последовательный ввод и вывод информации. На практике часто используют комбинации видов ввода и вывода: последовательный ввод и параллельный вывод, параллельный ввод и последовательный вывод. Кроме этого сдвиговый регистр можно построить таким образом, что информацию, загруженную в него, возможно сдвигать в двух направлениях: либо вправо (в сторону младших разрядов сдвигаемого числа), либо влево (в сторону старших разрядов сдвигаемого числа). Такие сдвиговые регистры называют *реверсивными*. Все эти возможности обеспечиваются дополнительными логическими элементами, которые соединяются между собой и с триггерами таким образом, чтобы обеспечить необ-

ходимую структуру регистра как единого целого. Пример структурной схемы реверсивного сдвигового регистра показан на рис. 14.6.

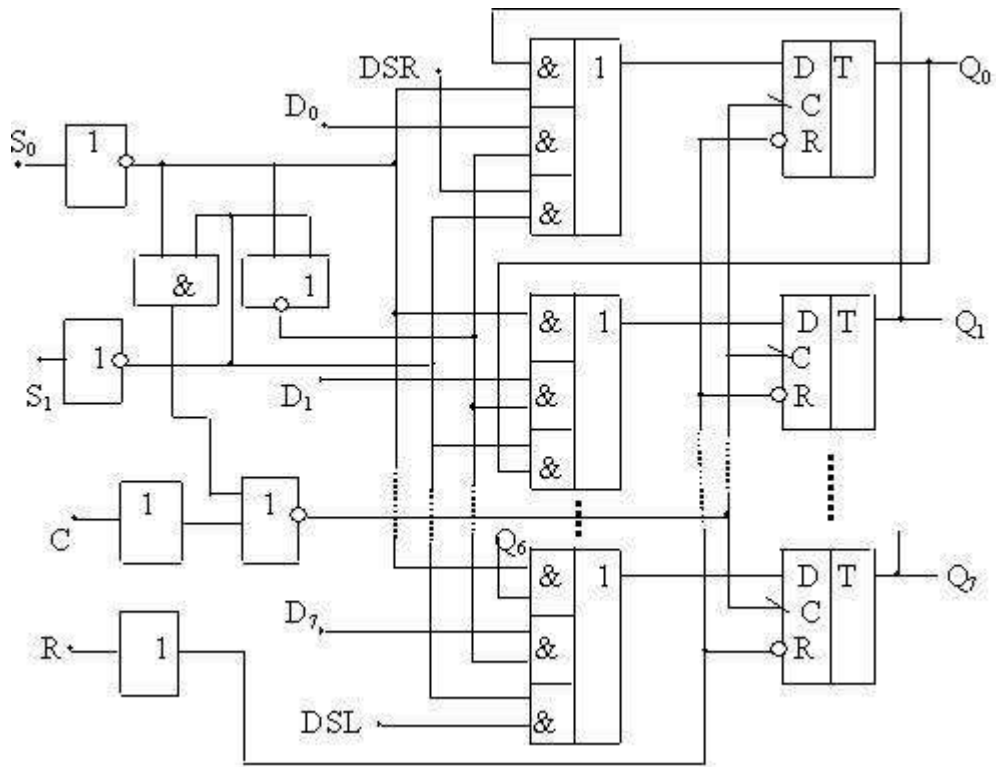


Рис. 14.6. Структурная схема универсального сдвигового регистра (регистр реверсивный, с параллельным выводом)

Условное графическое обозначение универсального регистра КР 1533 ИР13 показано на рис. 14.7.

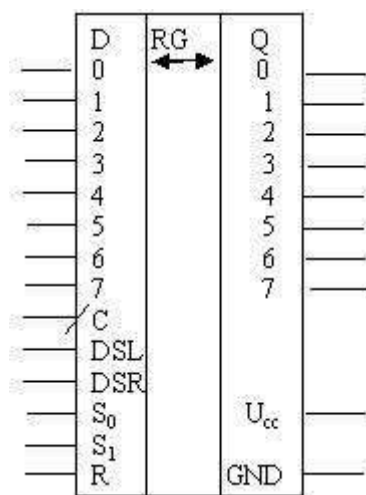


Рис. 14.7. Условное графическое обозначение регистра КР1533ИР13

Функциональные возможности регистра отражены в его таблице функционирования (табл. 14.3).

Таблица 14.3

Таблица функционирования реверсивного регистра

Режимы	Входы							Выходы				
	C	R	S ₀	S ₁	DSR	DSL	D _n	Q ₀	Q ₁		Q ₆	Q ₇
Сброс	x	0	x	x	x	x	x	0	0		0	0
Хранение	↑	1	0	0	x	x	x	Q ₀	Q ₁		Q ₆	Q ₇
Сдвиг влево	↑	1	1	0	x	0	x	Q ₁	Q ₂		Q ₇	0
Сдвиг вправо	↑	1	1	0	x	1	x	Q ₁	Q ₂		Q ₇	1
		1	0	1	0	x	x	0	Q ₀		Q ₅	Q ₆
Параллельная загрузка	↑	1	0	1	1	x	x	1	Q ₀		Q ₅	Q ₆
		1	1	1	x	x	D _n	D ₀	D ₁		D ₅	D ₆

14.3. Синхронные сдвиговые регистры с обратными связями

Обратные связи в сдвиговых регистрах осуществляют, соединяя выходы регистра с управляющими входами триггеров, образующих структуру регистра, с использованием дополнительных комбинационных схем.

В простейшем случае обратную связь образуют соединением выхода комбинационной схемы с первым каскадом сдвигового регистра, как показано на рис. 14.8, где обозначено: А, В, С....N – цепочка триггеров; ТИ – тактовые импульсы; F – логическая функция обратной связи.

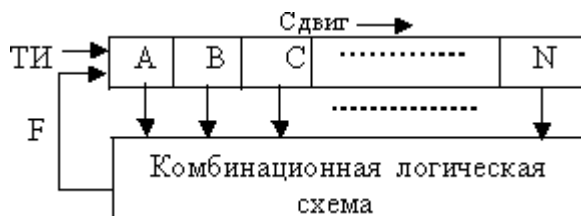


Рис. 14.8. Структурная схема организации обратной связи для сдвигового регистра

Принцип действия и возможности трехразрядного регистра сдвига с обратной связью и числом каскадов N=3 выясняются при построении его диаграммы состояний. Следует учесть, что трехразряд-

ное двоичное число может принимать восемь значений. Принцип построения диаграммы состоит в том, что необходимо назначить исходное состояние регистра, а следующее состояние будет зависеть от того, какое значение имеет функция обратной связи F . Если, например, исходное состояние $ABC=000$, а $F=0$, то состояние регистра не изменится; если $F=1$, то следующее состояние регистра будет $ABC=100$ и т.д. (рис. 14.9).

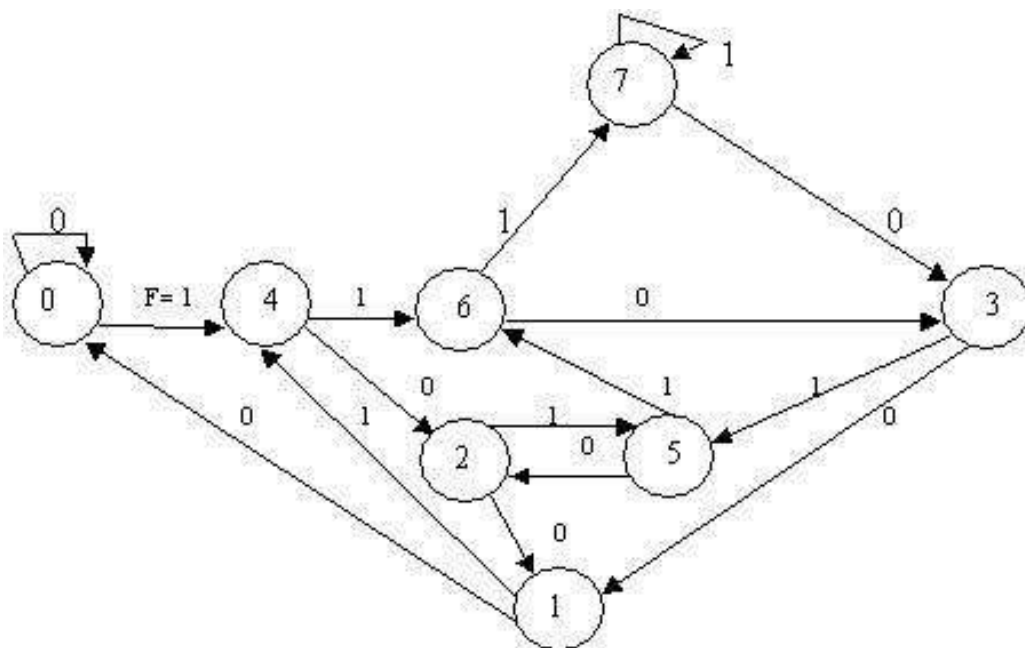


Рис. 14.9. Диаграмма состояний трехразрядного регистра сдвига с обратной связью

На диаграмме состояния регистра обозначены цифрами в кружках, причем значения цифр соответствуют десятичным значениям двоичных чисел, образующихся в регистре после очередного сдвига. Диаграмма показывает, что регистр позволяет выполнить несколько циклов сдвига, однако максимальная длина цикла равна $2^3=8$. Для синтеза логической функции F , обеспечивающей выбранный цикл сдвига, нужно составить таблицу состояний регистра. С этой целью в таблицу записываем исходное сочетание логических переменных для трех выходов триггеров ABC . Справа записываем значение функции обратной связи, изменяющей исходное состояние, в следующей строке записываем новое состояние, в котором окажется регистр после сдвига и т.д.

№ состояния	A	B	C	F
0	0	0	0	1
4	1	0	0	1
6	1	1	0	1
7	1	1	1	0
3	0	1	1	1
5	1	0	1	0
2	0	1	0	0
1	0	0	1	0

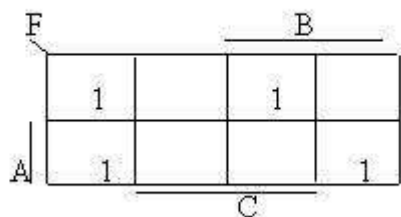


Рис. 14.10. Таблица состояний и карта Карно для сдвигового трехразрядного регистра

Используя карту Карно, получим логическое выражение для функции F :

$$F = \overline{B} \overline{C} + A \overline{C} + ABC.$$

По найденному выражению, используя логические элементы, синтезируется часть схемы сдвигового регистра, образующая функцию обратной связи F в соответствии с таблицей состояний, при этом следует учитывать конкретный вид триггеров регистра. Следует отметить, что функция обратной связи значительно усложняется с увеличением числа разрядов регистра, так как зависит от состояния всех триггеров, образующих регистр.

14.4. Функциональные узлы на базе регистров сдвига

На основе сдвигового регистра, синтезируя нужные схемы управления, можно реализовать разнообразные цифровые функциональные узлы. Примеры реализации приведены ниже [5].

Сдвиговый регистр-кольцевой счетчик. На практике обычно используется цикл с одной единицей, циркулирующей в кольце, образованном сдвиговым регистром с логическими цепями, формирующими функцию обратной связи. Максимальная длина цикла в этом случае $L=n$, где n – число каскадов регистра.

В качестве примера рассмотрим методику синтеза трехканального распределителя тактов, выполненного на сдвиговом регистре, замкнутом в кольцо (такой распределитель можно назвать счетчиком в коде «1 из n »).

В диаграмме состояний трехразрядного регистра (рис. 14.11) следует выбрать для реализации цикла только те состояния, в коде которых имеется лишь одна единица. Остальные состояния должны быть

исключены, так как в нашем случае они являются ложными (на диаграмме их изобразим не в кружках, а в прямоугольниках). Диаграмме состояний соответствует таблица истинности, в которой нужно отразить конкретные значения логических переменных на выходах триггеров синтезируемого устройства при поступлении тактирующих импульсов на входы синхронизации регистра. Синтез схемы управления триггерами делается по таблице после выбора вида используемых триггеров.

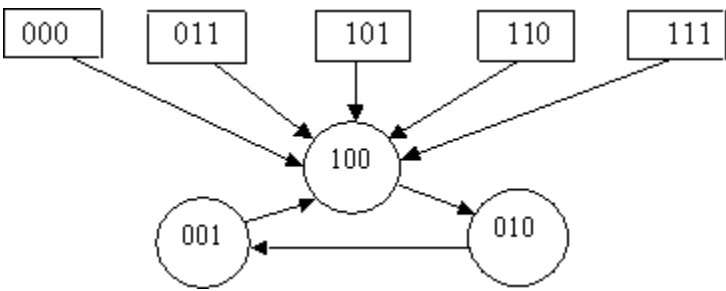


Рис. 14.11. Диаграмма состояний трехканального распределителя на кольцевом регистре

Таблица истинности для рассматриваемого случая показана в табл. 14.4.

Таблица 14.4
Таблица истинности
регистра-кольцевого счётчика

Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q _{1t}	Q _{2t}	Q _{3t}
0	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	1
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	0
1	0	1	1	0	0
1	1	0	1	0	0
1	1	1	1	0	0

Диаграмма состояний и таблица истинности показывают, что при случайном попадании сдвигового регистра в одно из состояний, показанных в прямоугольниках (рис. 14.11), система управления вернет регистр в состояние 100, с которого начнется очередной цикл сдвига.

Реализация схемы наиболее простой получается при использовании триггеров типа D. Функция возбуждения (переключения) для них: $D_n = Q_{nt}$.

Анализ таблицы с помощью карт Карно дает:

$$D_1 = Q_2 Q_1 + Q_2 Q_1 + Q_3; \quad D_2 = Q_1 Q_2 Q_3; \quad D_3 = Q_1 Q_2 Q_3.$$

Полученные логические соотношения позволяют синтезировать структурную схему распределителя импульсов на кольцевом регистре (рис. 14.12).

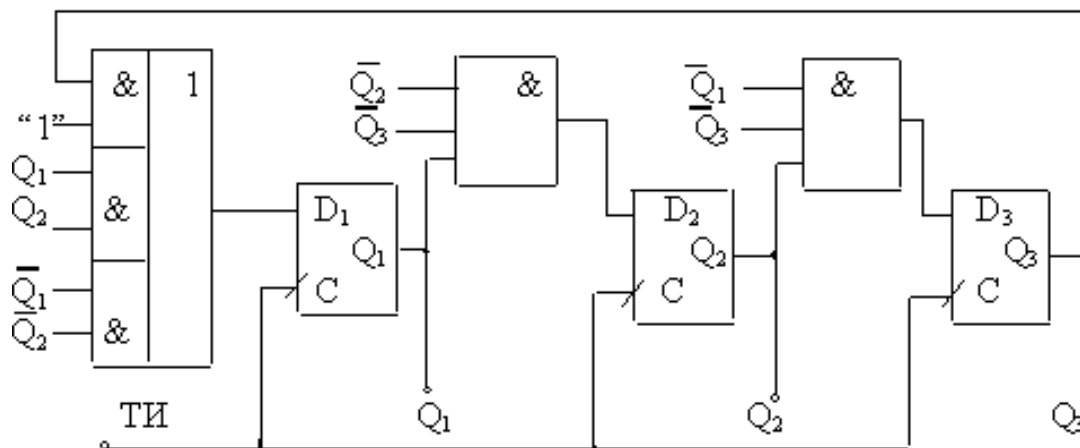


Рис. 14.12. Структурная схема трехканального распределителя импульсов (инверсные выходы и входы сброса триггеров не показаны)

Методика синтеза кольцевых регистров сдвига – распределителей импульсов для большего количества каналов не отличается от рассмотренной выше.

Сдвиговый регистр-счетчик Джонсона. Кольцевой регистр с перекрестной обратной связью, замкнутой на первый триггер от инверсного выхода последнего триггера, известен как счетчик Джонсона [5]. Достоинство счетчика Джонсона в простоте структуры, обеспечивающей к тому же и простоту схем преобразования его выходного кода в код «1 из N» для получения выходов распределителя импульсов. Структурная схема счетчика и временные диаграммы его работы показаны на рис. 14.13.

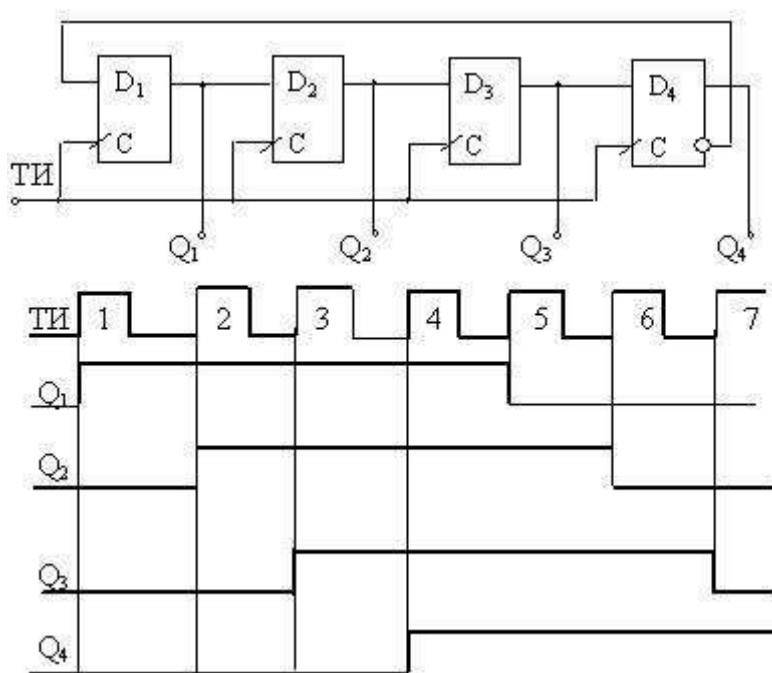


Рис. 14.13. Структурная схема четырехразрядного счетчика Джонсона и временные диаграммы его работы

Одно из отличительных свойств счетчика Джонсона – он имеет $2n$ состояний, т.е. в два раза больше, чем обычный кольцевой сдвиговый регистр.

Преобразование выходного кода счетчика в код «1 из N» производится добавлением одного двухвходового элемента И либо И-НЕ на каждый выход. На основе счетчика Джонсона изготавливаются интегральные схемы распределителей в сериях элементов КМОП, например ИС К561ИЕ8 [22].

Генераторы псевдослучайных последовательностей (ГПСП). ГПСП используются в устройствах тестового диагностирования цифровых устройств, при моделировании систем с учетом случайного разброса параметров их элементов и т.п. Наиболее простые реализации ГПСП представлены так называемыми генераторами М-последовательностей, которые способны формировать последовательности с периодом $2^n - 1$, где n – число разрядов сдвигового регистра [5]. Для генерации М-последовательностей необходимо организовать обратную связь с выходов первого и n -го триггеров регистра через элемент сложения по модулю 2 на вход первого триггера. Упрощенная структурная схема генератора М-последовательности с периодом $2^4 - 1 = 15$ показана на рис. 14.14.

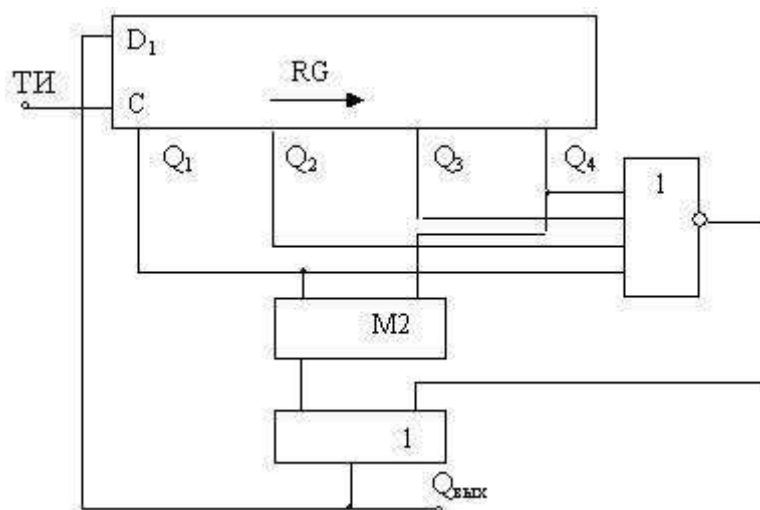


Рис. 14.14. Генератор 15-разрядной последовательности двоичных символов

Процесс генерации поясняется табл. 14.5. Образование выходной последовательности происходит после запуска генератора согласно логическому выражению $Q_{\text{вых}} = D_1 = Q_1 \otimes Q_4$. Исходное состояние обеспечивается логическими элементами 2И и 4И-НЕ после активизации схемы, т.е. после подачи питания и начального сброса триггеров регистра.

Таблица 14.5

Таблица истинности для генератора

№ ТИ	Q ₄	Q ₃	Q ₂	Q ₁	Q _{вых}	№ТИ	Q ₄	Q ₃	Q ₂	Q ₁	Q _{вых}
0	0	0	0	0	1	9	1	0	1	1	0
1	0	0	0	1	1	10	0	1	1	0	0
2	0	0	1	1	1	11	1	1	0	0	1
3	0	1	1	1	1	12	1	0	0	1	0
4	1	1	1	1	0	13	0	0	1	0	0
5	1	1	1	0	1	14	0	1	0	0	0
6	1	1	0	1	0	15	1	0	0	0	1
7	1	0	1	0	1	16	0	0	0	1	1
8	0	1	0	1	1						

Анализ табл. 14.5 показывает, что после вхождения в рабочий цикл, начиная с тактового импульса (ТИ № 1), повтор состояния на выходах триггеров будет наблюдаться на 16-м ТИ, следовательно генерируется последовательность 111101011001000. Эта последовательность повторяется со сдвигом на выходе каждого триггера.

Сдвиговой регистр как устройство деления полиномов. Если в схеме ГПСП ввести дополнительный вход на элемент сложения по модулю 2, то получится устройство для аппаратного выполнения операции деления полиномов по правилам арифметики по модулю 2. Такое устройство применяется для построения средств тестового диагностирования, построения и анализа циклических кодов. В частности, сдвиговой регистр, выполняющий деление полиномов, широко используется в сигнатурных анализаторах.

В этих устройствах входная двоичная последовательность подается на дополнительный вход элемента сложения по модулю 2 и трактуется как полином, который с помощью сдвигового регистра делится на другой полином, структура которого определяется схемой обратных связей, подающих сигналы выходов триггеров на входы элемента сложения по модулю 2. Этот полином часто называют порождающим. В результате деления в регистре образуется остаток от деления входной двоичной последовательности на двоичную последовательность, соответствующую структуре порождающего полинома. Этот остаток в сигнатурном анализаторе называют *сигатурой* и применяют для диагностирования цифровых устройств.

В качестве примера рассмотрим процесс образования сигнатуры в 8-разрядном сдвиговом регистре для заданной 12-разрядной тестовой последовательности. Структурная схема устройства представлена на рис. 14.15.

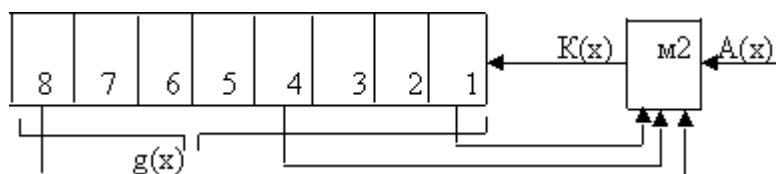


Рис. 14.15. Структурная схема делителя полиномов

В структурной схеме триггеры показаны условно, а три отвода от выходов триггеров № 1, 4, 8 образуют обратные связи и включены к входам схемы сложения по модулю 2. 12-разрядная двоичная последовательность $A(x)$ подается на дополнительный вход схемы м2. В такой N-структуре на вход первого триггера подается комбинация $K(x) = A(x) \oplus Q_8 \oplus Q_4 \oplus Q_1$, а образующий полином в этом случае

будет $g(x) = 10001001$. Образование остатка от деления полиномов показано в табл. 14.6.

Таблица 14.6
Образование остатка от деления

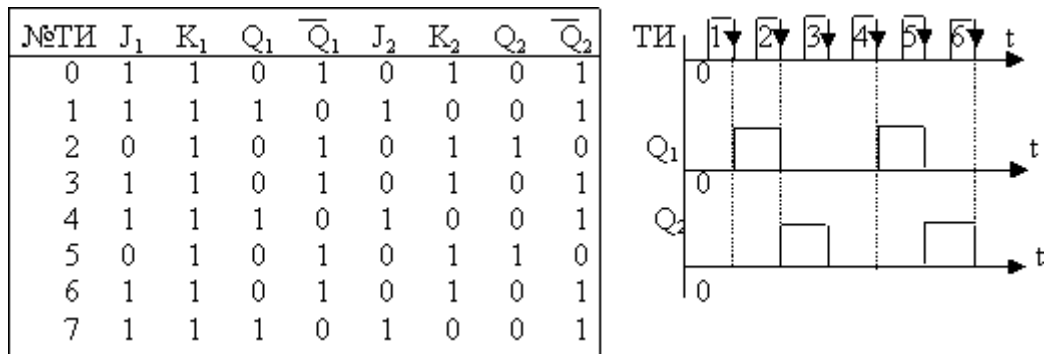
8	7	6	5	4	3	2	1	$K(x)$	$A(x)$	№ такта
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2
0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	4
0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	5
0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	6
0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	7
1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	8
0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	9
0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	10
1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	11
1	1	1	1	0	0	0	1	-	-	12

Предполагается, что регистр сдвига реализован на D-триггерах, двоичная последовательность $A(x) = 110110011111$. Остаток от деления – $Q(x) = 11110001$ (последняя строка в табл. 14.6).

Делители частоты с нечетным коэффициентом деления. Известно, что цепочка из последовательно соединенных Т-триггеров обеспечивает деление частоты входных импульсов в 2^n раз, где n – число триггеров. Для построения делителей частоты с нечетным коэффициентом деления можно использовать сдвиговый регистр на JK-триггерах с внешними обратными связями [5]. Реализация структурной схемы осуществляется после синтеза таблицы состояний, отражающей переключение триггеров в процессе тактирования. Таблица строится после принятия исходного состояния выходов триггеров и управляющих сигналов на входах триггеров, соответствующих принятым состояниям (удобно принять $Q_1=0, \dots, Q_n=0$). Построим, например, делитель частоты входных импульсов на 3. При синтезе таблицы следует помнить, что для JK-триггеров комбинация $J=1, K=1$ при тактировании соответствует счетному режиму работы, комбинация $J=0, K=1$ – установке 0. Синтезированная таблица и соответствующие ей временные диаграммы сигналов показаны в табл. 14.7.

Таблица 14.7

Таблица состояний делителя частоты и диаграммы сигналов



Анализ таблицы дает соотношения: $J_1 = \overline{Q_2}$, $K_1 = 1$, $J_2 = Q_1$, $K_2 = \overline{Q_1}$. Синтезированная схема представлена на рис. 14.16.

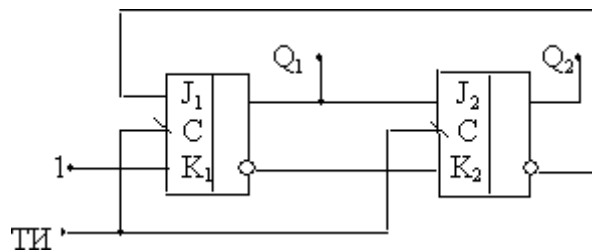


Рис. 14.16. Структурная схема делителя частоты тактовых импульсов на 3 (ТИ – вход тактового импульса)

Аналогичным способом можно синтезировать схему делителя частоты на сдвиговом регистре с любым нечетным коэффициентом деления.

Преобразователь кодов на сдвиговом регистре. Преобразователи параллельного кода в последовательный или последовательного в параллельный имеют разнотипные входы и выходы и строятся на регистрах сдвига. В качестве примера рассмотрим схему преобразователя параллельного кода в последовательный на основе 8-разрядного регистра с параллельным входом и последовательным выходом [5] (рис. 14.17).

Преобразователь работает следующим образом. В исходном состоянии $DSR=1$, $D_0=0$, $C=1$, $St=1$, на входе присутствует преобразуемое информационное слово ($D_1...D_7$). Загрузка в регистр информации осуществляется при подаче на вход St кратковременного (короткого) импульса низкого уровня.

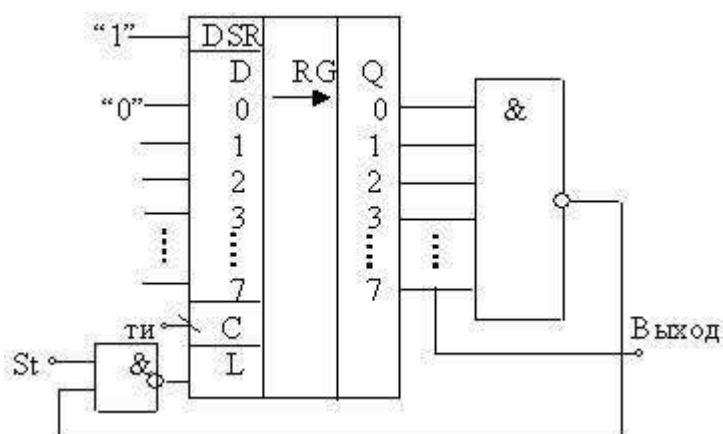


Рис. 14.17. Преобразователь параллельного кода в последовательный

Образующийся на входе L короткий единичный импульс разрешает загрузку входного информационного слова в разряды (1....7), а в нулевой разряд – «0». По мере поступления тактовых импульсов на вход C загруженное слово с каждым спадом импульса сдвигается вправо (от разряда 0 к разряду 7). На выходе слово будет появляться поразрядно в последовательном виде, начиная с седьмого разряда. После первого разряда идет логический нуль, а за ним появится цепочка логических единиц, так как логическая единица постоянно присутствует на входе DSR. В момент появления логических единиц на всех входах 8-входового элемента И-НЕ на его выходе формируется сигнал низкого уровня, разрешающий со стартовым сигналом St загрузку очередного информационного слова.

14.5. Электронные счетчики

Счетчиками называют функциональные узлы, в которых выходной код отражает число импульсов, поступающих на его входы. Счетчики, как и регистры, строятся на основе триггеров, соединяемых последовательно с помощью комбинационных схем, формирующих сигналы управления триггерами. Отличительной особенностью счетчика является возможность выполнения двух операций над кодовыми словами: *инкремент* – увеличение кодового слова на единицу и (или) *декремент* – уменьшение слова на единицу. Вместе с этим счетчики могут выполнять операции над кодовыми словами, характерные для регистров: установку в исходное состояние, запись входного слова, хранение и выдачу хранимой информации.

Основным параметром счетчика является *модуль счета* M – это максимальное число кодовых комбинаций на выходе счетчика, после которого счетчик возвращается в исходное состояние. Быстродействие счетчика характеризуется временем установления выходного кода – интервалом времени между моментом подачи входного сигнала и моментом установления нового кода на выходе.

Краткая классификация счетчиков. По направлению счета счетчики делятся на *суммирующие* (прямого счета), *вычитающие* (обратного счета) и *реверсивные* (с изменением направления счета). У суммирующего счетчика его выходной код по мере поступления счетных импульсов изменяется в сторону увеличения его числового эквивалента.

По значению модуля счета счетчики подразделяют на *двоичные*, модуль счета которых равен целой степени числа 2 ($M=2^n$), и *двоично-кодированные*, у которых модуль счета не равен целой степени числа 2. Помимо двоичных различают ещё счетчики Джонсона, счетчики с кодом «1 из N» и другие.

По способу организации межразрядных связей счетчики делятся на счетчики с последовательным, параллельным и комбинированным переносом. У счетчиков с последовательным переносом переключение триггеров происходит последовательно один за другим. У счетчиков с параллельным переносом переключение триггеров разрядных схем осуществляется по сигналу синхронизации одновременно.

Счетчик, как функциональный узел, относится к классу автоматов, поэтому по принадлежности к тому или другому виду автоматов различают *синхронные* и *асинхронные* счетчики.

Двоичные счетчики. Вид структурной схемы двоичного счетчика определяется из анализа его таблицы истинности, представляющей собой последовательность двоичных чисел от нуля до $M-1$. Анализ показывает, что младший разряд счетчика переключается от каждого входного импульса, следующий по старшинству разряд переключается с частотой, в два раза меньшей и т.д. Известно, что простейшим делителем частоты в два раза является счетный триггер (Т-триггер). Таким образом, двоичный счетчик должен содержать цепочку соединенных между собой последовательно счетных триггеров.

Число триггеров определяется по условию $n = \log_2 M$. Например, двоичный счетчик с модулем счета $M=8$ будет содержать три счетных триггера, с модулем $M=16$ – четыре триггера и т.д. Структурная

схема двоичного счетчика с модулем $M=8$ и временные диаграммы его работы показаны на рис. 14.18.

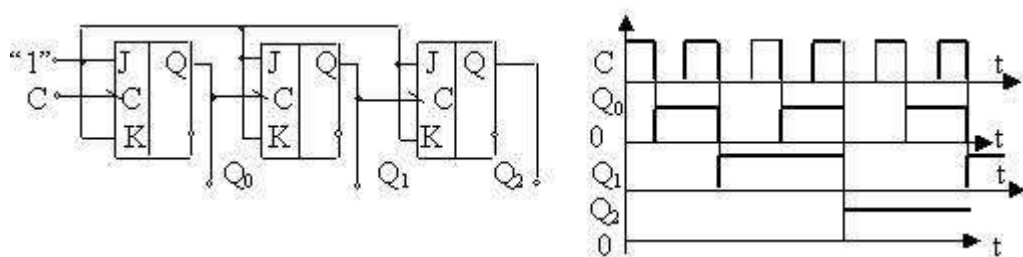


Рис. 14.18. Структурная схема суммирующего двоичного счетчика с модулем счета $M=8$ и временные диаграммы его работы

Отличие вычитающего счетчика (счетчика обратного счета) от суммирующего состоит в направлении переключения предыдущего разряда, вызывающего переключение последующего. У суммирующего счетчика это переключение происходит от «1» к «0», а у вычитающего — от «0» к «1».

Если схема строится на счетных триггерах с прямым динамическим управлением (срабатывание триггера по «фронту»), то характер подключения следующих триггеров к предыдущим для получения счетчика обратного счета будет таким же, как на рис. 14.18.

В структуре реверсивного счетчика для реализации его на триггерах с прямым динамическим управлением в межрегистровые связи необходимо вставить логические переключатели соединительных линий, как показано на рис. 14.19.

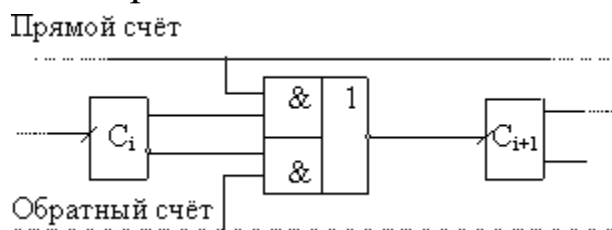


Рис. 14.19. Структурная схема межрегистровой связи в реверсивном двоичном счетчике (триггеры показаны условно)

Рассмотренные выше структуры относятся к асинхронным счетчикам, так как в них переключение триггеров происходит не одновременно, а последовательно один за другим. Время установления кода в асинхронном счетчике составит величину $t_y = n \cdot t_{mp}$, где t_{mp} — собственное время переключения триггера. Для получения максимального быстродействия используют синхронные счетчики с параллельным переносом. Время установления нового кода на выходе та-

ких счетчиков теоретически не зависит от их разрядности и приближенно равно t_{mp} . В структурных схемах таких счетчиков сигнал синхронизации подаётся одновременно на все разрядные триггеры, а межразрядные связи осуществляются с помощью конъюнкторов.

Счетчики такого типа имеют ещё одно название – *счетчики со сквозным переносом*. Пример схемы показан на рис. 14.20.

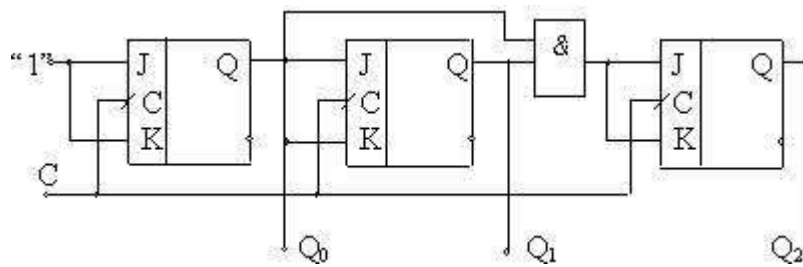


Рис. 14.20. Структурная схема синхронного (параллельного) счетчика прямого счета с модулем $M=8$

Двоично-кодированные счетчики с произвольным модулем.

Двоично-кодированные счетчики строятся на основе двоичных, но их разрядность определяется из условия $n = \lceil \log M \rceil$, где $\lceil \rceil$ – знак округления до ближайшего большего числа. В этом случае двоичный счетчик будет иметь некоторое число лишних состояний $L = 2^n - M$, которые необходимо исключить. В схемах с естественным порядком счета (с нулевым начальным состоянием счетчика) обычно исключают последние состояния. Существуют два основных способа построения счетчиков с произвольным модулем счета: *модификация межразрядных связей и управление сбросом*.

При синтезе счетчика на основе модификации межразрядных связей в таблице функционирования исключаются лишние состояния, а функции возбуждения для триггеров определяются обычным для синтеза автоматов способом. При управлении сбросом выявляется момент достижения содержимым счетчика значения $(M - 1)$, что является сигналом сброса в следующем такте. После сброса начинается новый цикл счета. Этот вариант построения счетчиков удобен тем, что для изменения модуля счета требуется лишь изменение кода, с которым сравнивается содержимое счетчика для определения момента сброса. В качестве примера построим структурную схему счетчика с $M=5$ методом модификации межразрядных связей. Функционирование счётчика отражено в табл. 14.8.

Таблица 14.8

Таблица функционирования счётчика

Исходное состояние			Следующее состояние			Функции возбуждения					
Q_2	Q_1	Q_0	Q_2	Q_1	Q_0	J_2	K_2	J_1	K_1	J_0	K_0
0	0	0	0	0	1	0	x	0	x	1	x
0	0	1	0	1	0	0	x	1	x	x	1
0	1	0	0	1	1	0	x	x	0	1	x
0	1	1	1	0	0	1	x	x	1	x	1
1	0	0	0	0	0	x	1	0	x	0	x

Для синтеза схемы используем карты Карно, полагая функции возбуждения зависимыми от трёх переменных исходного состояния (рис. 14.21).

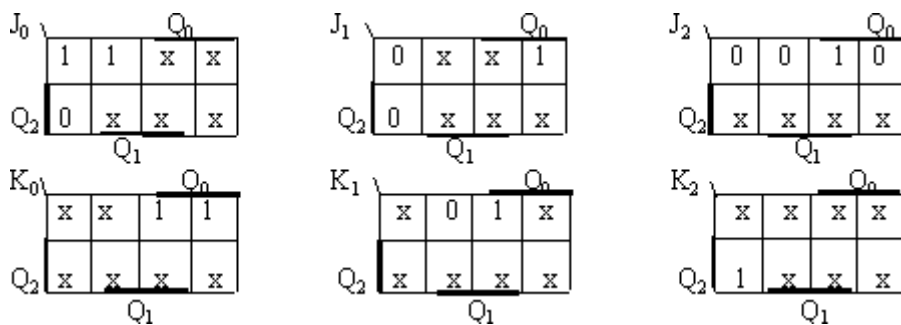
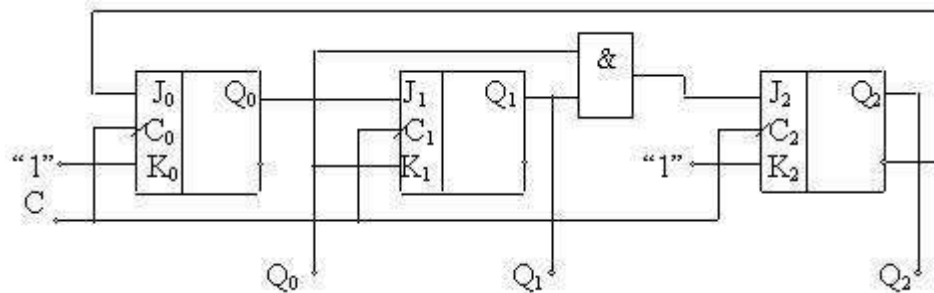


Рис. 14.21. Карты Карно для функций возбуждения триггеров счетчика

По картам получаем аналитические соотношения следующего вида:

$$\overline{J_0} = Q_2; K_0 = K_2 = 1; J_1 = K_1 = Q_0; J_2 = Q_1 Q_0.$$

Синтезированная согласно полученным результатам схема показана на рис. 14.22.

Рис. 14.22. Структура синхронного счетчика с модулем счета $M=5$

Синтез счетчика методом управляемого сброса. Если триггеры счетчика со сквозным переносом снабдить входами сброса и добавить дополнительный многовходовой конъюнктор, то, используя метод управляемого сброса, можно построить устройство с любым модулем

счета. Основная идея метода управляемого сброса состоит в принудительном формировании сигнала сброса в момент, когда достигается нужное значение модуля счета.

Иллюстрацией использования рассматриваемого метода может служить преобразование двоичного 4-разрядного счетчика со сквозным переносом ($M=16$) в двоично-десятичный счетчик (рис. 14.23) [5].

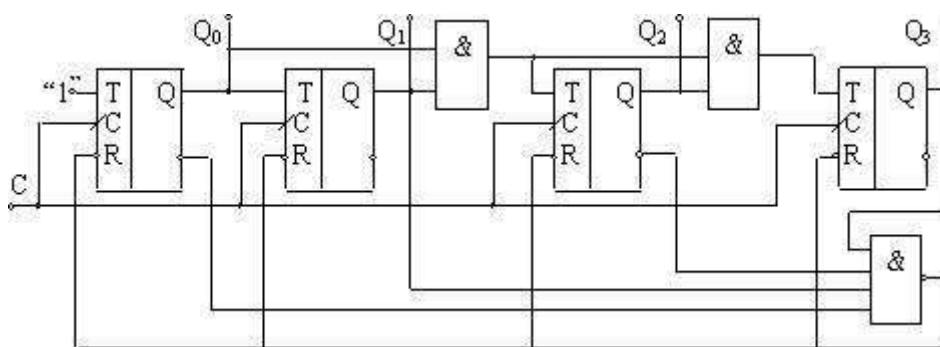


Рис. 14.23. Структурная схема 4-разрядного двоично-десятичного счетчика, синтезированного методом управляемого сброса

15. ЗАПОМИНАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Проектирование сложных цифровых устройств не обходится без применения запоминающих устройств (ЗУ), которые могут сохранять цифровую информацию.

Для кратковременного хранения используют регистры, состоящие из множества триггерных ячеек. Если необходимо длительное время хранить большие объемы информации, то необходимо использовать специально предназначенные для этого устройства, в частности микросхемы ЗУ. Это позволяет существенно упростить аппаратную часть электронных устройств.

Для целей хранения цифровой информации сейчас разработано большое число технических решений, причем эта часть электроники бурно развивается по пути увеличения объемов информации, уменьшения габаритов устройств, повышения надежности долговременного хранения (CD-диски, брелки и т.п.). В конспекте лекций будут рассмотрены только принципы построения и использования полупроводниковых ЗУ, т.е. устройств, выполненных в виде интегральных микро-схем [17].

15.1. Основные параметры и виды запоминающих устройств

К основным параметрам ЗУ относятся:

1. Емкость ЗУ. Единица измерения – 1 бит (разряд), 8-битное слово – байт. 2^{10} бит = 1024 бит = 1 Кбит; 2^{20} бит = 1048576 бит = 1 Мбит.

2. Организация ЗУ – это число кодовых слов с указанием их разрядности (длины). $M = NL$, где N – число кодовых слов, L – число разрядов в коде. Например: $M = 256$ бит: это могут быть ЗУ с организацией 32x8, 256x1, 64x4. Структура этих ЗУ будет разная, разная цоколёвка корпуса микросхемы и разные схемы соединения с другими элементами.

3. Динамические параметры ЗУ характеризуются многими временными параметрами. Из них наиболее важными являются следующие:

а) время выборки – время от момента подачи на вход ЗУ команды на выдачу информации до момента установления данных на выходе;

б) время выборки адреса, t_A , н.с.;

в) время выбора микросхемы, t_{CS} , н.с.;

г) время цикла записи, t_{CYWR} , н.с. – время от подачи до установления сигналов на управляющих входах в режиме записи;

д) время цикла считывания (чтения) – время от подачи до установления сигналов на управляющих входах в режиме считывания t_{CYRD} , н.с.;

е) емкости: входная C_1 , pF; выходная C_o , pF; емкость нагрузки, C_L , pF.

Следует помнить, что прежде чем считать информацию из ЗУ, требуется найти ее местоположение, т.е. определить координаты ячеек, где эта информация находится. Аналогично при записи: прежде чем записать (запомнить) нужно указать адрес, куда эта информация должна попасть. Алгоритмы управления процессами записи и считывания можно показать на временных диаграммах изменения сигналов управления (рис. 15.1).

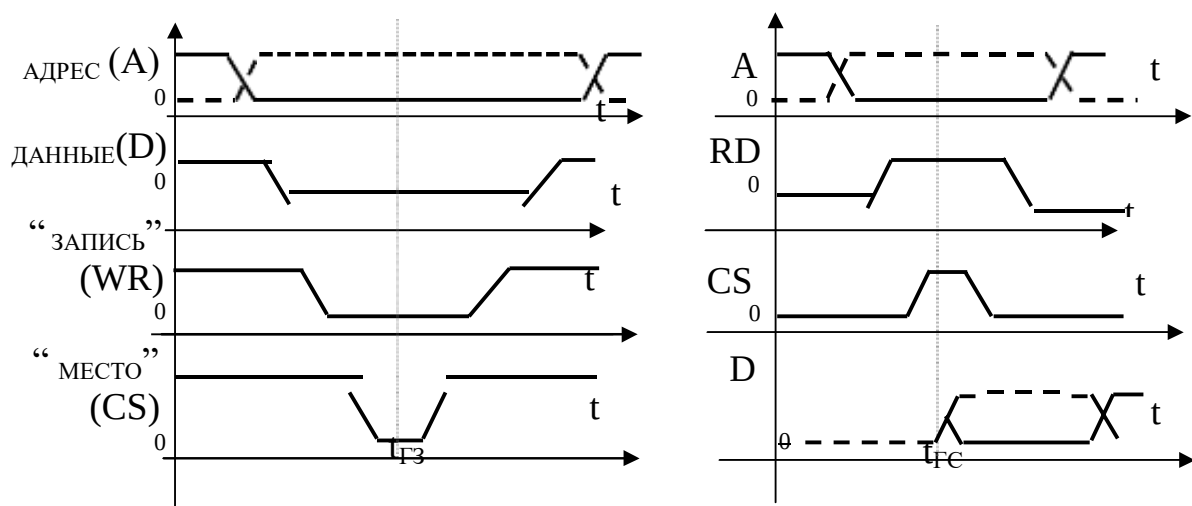


Рис. 15.1. Временные диаграммы изменения сигналов управления записью информации в ЗУ (а) и считыванием (б)

На диаграммах обозначено: А – адрес ячейки памяти; D – команда на выставление (при записи) или получение (при считывании) данных; WR – сигнал готовности к записи; RD – сигнал готовности к чтению (считыванию); CS – сигнал, определяющий микросхему, с которой нужно работать в данный момент времени; $t_{ГЗ}$ – момент готовности к записи; $t_{ГЧ}$ – момент готовности к считыванию. На диаграммах видно, что в ЗУ операции с данными осуществляются только в те моменты времени, когда на входах управления установлены все необходимые логические сигналы. Это необходимо для обеспечения надежной работы ЗУ. По выполняемым функциям различают: *оперативные* запоминающие устройства (ОЗУ) и *постоянные* запоминающие устройства – ПЗУ (соответствующая английская аббревиатура – RAM и ROM). Оперативные ЗУ используют для временного хранения информации, полученной в процессе работы. ОЗУ могут быть статическими и динамическими. В статических ОЗУ записанная информация хранится в виде состояния триггерных ячеек памяти и при ее считывании не разрушается. Она разрушается, когда выключается напряжение питания или ее принудительно удаляют (стирают). В динамических ОЗУ информация хранится в виде заряда конденсатора и постоянно циркулирует в массиве конденсаторов, выделенном для её хранения. Считывание из динамического ОЗУ разрушает информацию и для восстановления её нужно периодически перезаписывать (осуществлять регенерацию – «подкачку»). Широко распространенные простые запоминающие ячейки статических ОЗУ в виде триггерных схем выполняют на МОП – транзисторах либо на

биполярных транзисторах. Для обеспечения доступа к ячейкам памяти триггерные схемы снабжаются адресными и разрядными шинами (проводниками) и шинами питания. Совокупность сигналов, подаваемых извне на эти шины схемами управления, должна обеспечивать выполнение следующих режимов работы ОЗУ: «хранение», «считывание», «запись». Для динамических ячеек памяти к этим режимам добавляется «регенерация».

15.2. Статические оперативные запоминающие устройства

Упрощенные структурные схемы триггерных ячеек статических ОЗУ показаны на рис. 15.2.

В схеме (рис. 15.2, а) VT₁, VT₆, VT₃ и VT₅ (МОП-транзисторы с индуцированным каналом *n*-типа) работают в ключевом режиме. VT₂, VT₄ (МОП-транзисторы со встроенным каналом *n*-типа) выполняют роль резисторов в триггерной схеме, так как обладают начальной проводимостью. Работа ячейки поясняется таблицей истинности (табл. 15.1).

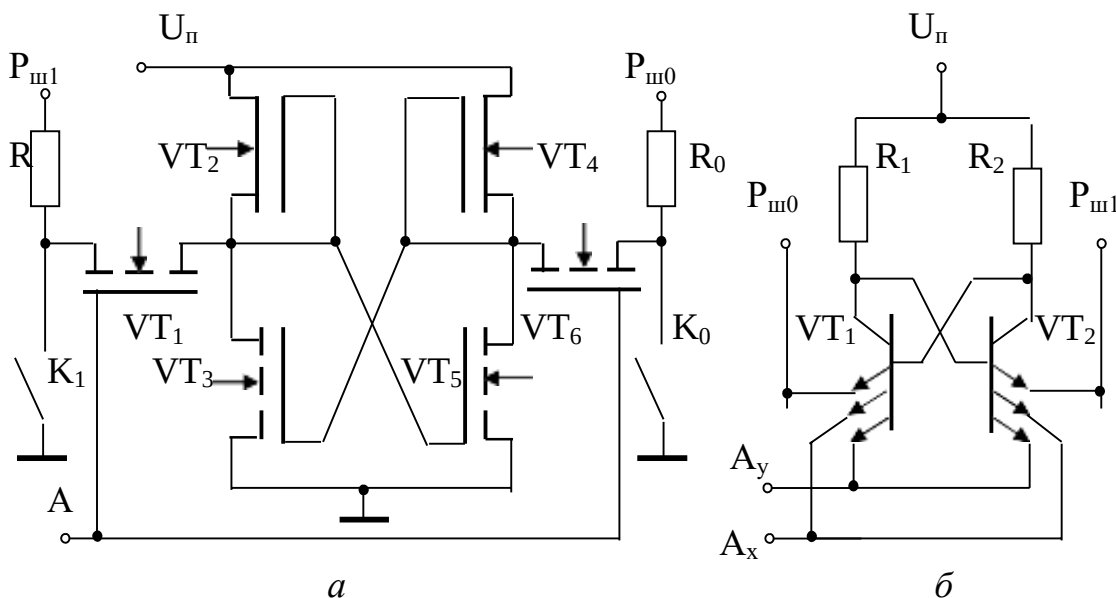


Рис. 15.2. Структурные схемы триггерных ячеек памяти на МОП-транзисторах (а) и на биполярных транзисторах (б)

Таблица 15.1

Таблица истинности ячейки

Режим	Потенциал шины $P_{ш1}$	Потенциал шины $P_{ш0}$	A	VT_1 , VT_6	VT_3	VT_5
Хранение нуля	0	0	0	закрыты	закрыт	открыт
Хранение единицы	0	0	0	закрыты	открыт	закрыт
(Пример) Считыв. «1»	Импульс заряда 	Импульс заряда 	1	VT_1 открыт	открыт	закрыт
Запись «0» (Пример)	1 (ключ K_1 разомкнут)	0 (ключ K_0 замкнут)	1	открыты оба	закрыт	открыт

В режиме хранения: на адресной шине – «нуль» ($A=0$), VT_1 и VT_6 закрыты, ячейка отсоединена от $P_{ш1}$ и $P_{ш0}$. При этом на разрядных шинах потенциал равен 0, так как ключи K_1 и K_0 замкнуты. Пусть в режиме «Хранение единицы» VT_3 открыт, а VT_5 – закрыт, так как потенциал затвора VT_5 равен потенциалу стока VT_3 (это подтверждение принятого положения). В режиме считывания сначала импульсом заряжаются до уровня «1» разрядные шины $P_{ш1}$, $P_{ш0}$, затем подается потенциал «1» на адресную шину ($A=1$), транзистор VT_1 открывается и подключает $P_{ш1}$ к точке управления триггером (к стоку транзистора VT_3) при этом открытый транзистор VT_3 подключается к разрядной шине $P_{ш1}$. Заряд, присутствовавший на $P_{ш1}$, создает импульс тока в цепи разрядная шина – общая шина через открытые транзисторы VT_1 , VT_3 . Протекание импульса тока является признаком считывания «1» для усилителя считывания, подключенного к разрядным шинам (на схеме не показан).

Режим записи: например, при записи «0» на $P_{ш0}$ устанавливается «0», на $P_{ш1}$ – «1», т.е. ключ K_1 размыкается, ключ K_0 – замыкается. Затем подается «1» на шину A, VT_1 и VT_6 открываются и подключают соответствующие электроды (сток VT_6 и затвор VT_3) к потенциалу «0». VT_3 закрывается, напряжение на его стоке увеличивается – открывается VT_5 , при этом закрывается и VT_1 (на его электродах напряжения сравниваются). Ячейка приняла положение записанного «0». Смена потенциала «1» адресной шины на нулевой потенциал (установка «0») переводит ячейку в режим «Хранение нуля», так как транзисторы VT_1 , VT_6 отключают ячейку от $P_{ш0}$ и $P_{ш1}$.

Запоминающий (статический) элемент ОЗУ на биполярных транзисторах (рис. 15.2, б) также представляет собой триггерную ячейку,

собранную на двух многоэмиттерных транзисторах с перекрестными базовыми связями. Различные сочетания управляющих сигналов, подаваемых на шины A_x , A_y , $P_{ш1}$, $P_{ш0}$, позволяют устанавливать режимы записи, хранения и считывания.

15.3. Динамические ОЗУ

В динамических ОЗУ используют ячейки памяти, в которых уровень «1» или «0» отождествляется с наличием или отсутствием заряда конденсатора, образованного структурой транзисторов при обратных смещениях. Так как заряд не может долго храниться, следует периодически производить регенерацию зарядов, что осуществляется специально организованным управлением. По этой причине для таких ОЗУ нужно иметь режимы: хранение, считывание, запись и регенерация. Основное достоинство динамических ОЗУ – более высокая информационная емкость (почти в четыре раза). Недостаток – усложнение управления из-за необходимости регенерации.

Простейший запоминающий элемент динамического ОЗУ может быть построен на одном МОП-транзисторе (рис. 15.3, а). Используется заряд-разряд конденсатора ёмкостью $\leq 0,1\text{pF}$. Величина приращения напряжения оказывается очень малой: $0,2 - 0,25\text{ В}$. Поэтому это напряжение должно быть хорошо усилено – это влечет усложнение усилителей считывания. При считывании происходит разрушение информации, поэтому ее надо восстанавливать.

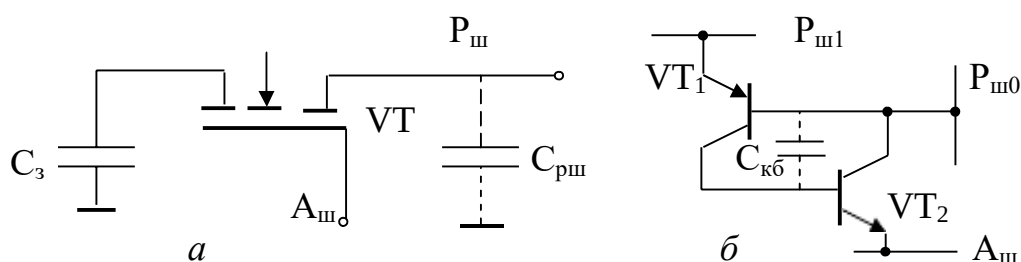


Рис. 15.3. Простейшие ячейки памяти динамических ОЗУ:
а – на МДП- транзисторе; б – на биполярном составном транзисторе

В схеме рис. 15.3, а запоминание «1» или «0» – это наличие или отсутствие заряда на конденсаторе C_z . В режиме записи сигнал, поданный на адресную шину $A_{ш}$, разрешает доступ к C_z (транзистор открыт), заряд с разрядной шины $P_{ш}$ переходит на C_z (большой заряд считается «1», меньший – «0»). В режиме считывания заряд с C_z переходит на емкость $C_{рш}$ (которая является паразитной ёмкостью раз-

рядной шины), причем $C_{рш} \gg C_z$ и равна нескольким пФ. Такое построение позволяет получить ОЗУ, обладающее большой информационной емкостью (несколько Мбит), но невысокой надежностью.

Для построения динамических ОЗУ на биполярных транзисторах используется специальная технология, при которой на кристалле формируется запоминающий элемент в виде емкости коллектор – база сдвоенного транзистора (рис. 15.3, б). Величина ёмкости $C_{кб}$ – около 1 пФ. В период хранения «конденсатор» хранит поданный на него заряд, а в режиме считывания – отдаёт его на разрядную шину.

15.4. Энергонезависимые оперативные запоминающие устройства

Основной недостаток ОЗУ – разрушение информации при снятии напряжения питания. Очевидный (и самый неэффективный) способ преодоления этого недостатка – сочетание ОЗУ и встроенной литиевой батарейки в одном корпусе микросхемы. Оригинальнее выглядит использование «запоминающих конденсаторов», которые способны сохранять электрическую поляризацию после снятия приложенного электрического напряжения (сегнето – электрический эффект). При смене направления вектора напряженности поля в таких конденсаторах меняется направление электрической поляризации кристаллического вещества. Конденсатор при этом имеет два устойчивых состояния и два различных пороговых напряжения перехода из одного состояния в другое и наоборот. Такими свойствами обладают, например, пленки цирконата – титана – свинца (РЗТ-керамика, $\epsilon = 1200$). Недостаток – ограниченное число циклов перезарядки, (приблизительно 10^{10} циклов). Ячейку памяти с таким конденсатором можно представить так, как показано на рис. 15.4.

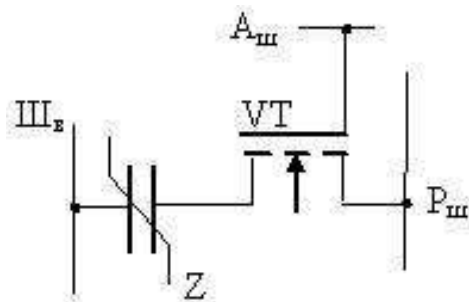


Рис. 15.4. Структурная схема ячейки памяти на основе «запоминающего» конденсатора:
 $Ш_v$ – шина импульсного возбуждения, $А_{ш}$ – адресная шина,

Можно так построить схемы управления, что при снятии питания конденсатор будет поляризоваться таким образом, чтобы его состояние соответствовало состоянию запоминающей ячейки до отключения питания. Время поляризации примерно 10 – 20 н.с., что значительно меньше времени разрушения информации в триггере.

Более перспективными являются ЗУ, сочетающие в себе свойства быстродействия, компактности, технологичности, простоты управления при обеспечении энергонезависимости, т.е. неразрушения информации в условиях исчезновения напряжения питания. К таким ЗУ относятся, в частности, ОЗУ, называемые в международной терминологии FRAM, MRAM, PFRAM [20].

FRAM – это ЗУ ферроэлектрического типа, PFRAM – разновидность ЗУ ферроэлектрического типа, в которых используются полимерные ферроэлектрические материалы (тонкие плёнки), обладающие свойством образования диполей в своей структуре. Участки с ориентированными диполями служат запоминающими элементами и в зависимости от направления поляризации хранят биты информации. Следует заметить, что ЗУ типа PFRAM для построения ОЗУ считаются менее перспективными вследствие их относительно небольшого быстродействия [20].

MRAM – это магниторезистивные ЗУ. В них запоминающим элементом является участок магнитного материала, способный сохранять приданное ему состояние намагниченности независимо от наличия или отсутствия питания схемы.

15.5. Основные структуры оперативных запоминающих устройств

Микросхемы ОЗУ могут иметь одноразрядную и многоразрядную (словарную) организацию. В структуре одноразрядной организации данные записываются и считываются по одному биту последовательным кодом, что позволяет уменьшить до минимума число вводов и выводов данных.

Структура микросхемы статического ОЗУ с одноразрядной организацией имеет вид, показанный на рис. 15.5.

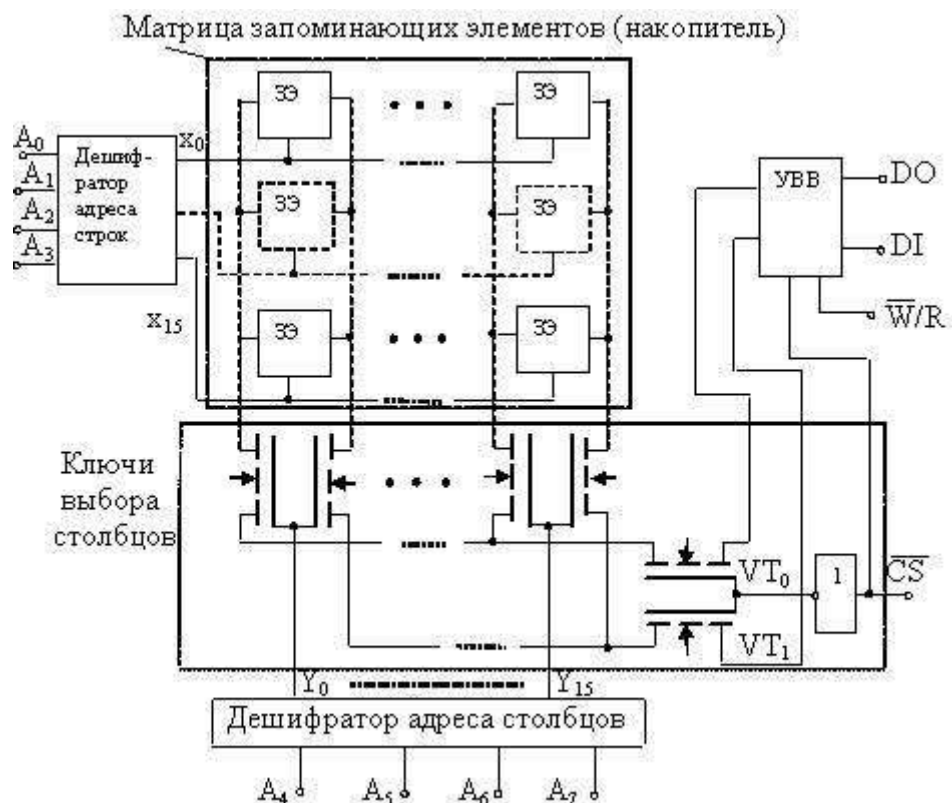


Рис. 15.5. Структурная схема одноразрядного статического ОЗУ

На рис. 15.5 обозначено: ($A_0 - A_3$) – адресные входы строк накопительной матрицы; ($A_4 - A_7$) – адресные входы столбцов матрицы; DO – выход данных при чтении (считывании); DI – вход данных при записи; W/R – вход сигнала «Запись»/ «Чтение»; CS – выбор микросхемы; УВВ – устройство ввода-вывода.

Запоминающий элемент (ЗЭ) представляет собой, например, триггерную схему, изображенную на рис. 15.2, а, причем в рассматриваемой схеме ключи выбора столбцов исполняют роль коммутаторов разрядных шин, изображенных на рисунке справа и слева возле каждого ЗЭ.

Транзисторы ЗЭ, затворами соединенные с адресной шиной элемента, подключены к шинам возбуждения строк, которые являются выходами дешифратора строк. При возбуждении строки сигналом выборки $x_0 - x_{15}$, снимаемым с выхода дешифратора адреса строк, ключевые транзисторы открываются и подключают входы-выходы триггера к разрядным шинам. При отсутствии сигнала выборки строк ($x = 0$) ключевые транзисторы закрыты и триггер изолирован от разрядных шин. Для сохранения информации требуется источник питания, т.е. ОЗУ – энергозависимое.

Особенность МОП (КМДП)-триггеров заключается в том, что в режиме хранения они потребляют незначительную мощность от источника питания. В режиме обращения, когда переключаются элементы матрицы, дешифраторы и другие функциональные узлы микросхемы, уровень энергопотребления возрастает на два – три порядка.

Доступ к разрядным шинам столбца со стороны УВВ обеспечивается сигналом $CS = 1$, открывающим ключи VT0, VT1. Настройку УВВ на прием сигнала для записи со входа DI осуществляет сигнал $\overline{W}/R = 1$.

В большинстве микросхем памяти УВВ содержит выходной ключевой усилитель – формирователь, способный принимать три состояния на выходе: «0», «1» и третье состояние (высокоомное), имеющее обозначение «Z».

По способу управления различают асинхронные и синхронизируемые (тактируемые) ОЗУ. У асинхронных статических ОЗУ сигналы управления могут быть поданы в виде уровней напряжений, соответственно 0 и 1, у тактируемых – в форме импульса.

Структура микросхемы статического ОЗУ со словарной организацией представлена на рис. 15.6.



Рис. 15.6. Структурная схема статического

ОЗУ со словарной организацией

Сигнал разрешения выхода $\overline{OE}$ позволяет в режиме хранения запрещать вывод информации: при $OE = 1$ входы-выходы $DIO_0 - DIO_7$ принимают третье состояние, информация на выходе отсутствует. В представленной схеме запись и чтение информации производится восьмиразрядными кодовыми словами, что повышает быстродействие устройства. По количеству адресуемых слов и их разрядности можно определить, что ёмкость рассматриваемого ЗУ составляет 2048 байт (2 КБ) или 16 Кбит.

Выбор определенного типа ЗУ при проектировании основывается на оценке их классификационных и статических параметров, перечисленных ниже.

Классификационные параметры:

- информационная емкость – число бит;
- число разрядов адреса – число слов адреса;
- число разрядов слова в ЗУ;
- K_p – коэффициент разветвления по выходу (нагрузочная способность);
- число циклов перепрограммирования;
- $P_{потр.}$ – мощность потребления в рабочем режиме;
- $P_{нагр.}$ – мощность потребления в режиме хранения;
- время хранения информации (быстродействие).

Статические параметры:

- U_{cc} – напряжение источника питания;
- I_{cc} – ток потребления;
- U_{ccs} – напряжение питания в режиме хранения;
- I_{ccs} – ток питания в режиме хранения;
- U_1 – уровень логической 1;
- U_0 – уровень логического нуля.

15.6. Постоянные запоминающие устройства

Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) предназначены для хранения информации, остающейся неизменной в течение длительного времени или всего времени эксплуатации устройства. Такая

информация обычно представляет собой либо кодовые преобразования, либо последовательности кодов управления согласно заданному алгоритму, либо константы, которые требуются для определенных вычислений.

В зависимости от технологии записи информации различают три подкласса ПЗУ: *масочные* ПЗУ, *программируемые* (прожигаемые) ПЗУ, *репрограммируемые* ПЗУ. ПЗУ обозначают на схемах аббревиатурой ROM.

В масочные ПЗУ, или ROM(M), информация записывается в процессе изготовления микросхем с помощью шаблона (маски). Прожигаемые ПЗУ – это однократно программируемые ПЗУ (программирование может делать пользователь). Репрограммируемые ПЗУ – ПЗУ, способные к многократному перепрограммированию.

В масочных ПЗУ используется простой принцип программирования: заготовка микросхемы (кристалл) формируется со всеми соединениями между элементами, а затем ненужные соединения ликвидируются. Элементом связи могут быть диоды, транзисторы, металлические перемычки и т.п. Фрагмент структуры диодного ROM(M) показан на рис. 15.7.

Принцип представления информации в таких ЗУ состоит в том, что информация представляется в виде наличия или отсутствия соединения между шинами адреса и шинами данных. Используя указанный принцип, разработаем структуру диодного ПЗУ, реализующего произвольную таблицу истинности, представленную в табл. 15.2.

Таблица 15.2

Таблица истинности ПЗУ

Вход		Выход								Сигнал
A ₁	A ₀	DO ₀	DO ₁	DO ₂	DO ₃	DO ₄	DO ₅	DO ₆	DO ₇	
0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	A _{ш0}
0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	A _{ш1}
1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	A _{ш2}
1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	A _{ш3}

Анализ табл. 15.2 показывает, что ЗУ должно содержать 32 бита двоичной информации и иметь восьмиразрядный выход, при этом выходное слово должно появляться на выходе при обращении к ЗУ с помощью двухразрядного слова. На основании анализа строим структурную схему на базе координатной сетки, содержащей восемь

столбцов и четыре строки. Используем дешифратор 2 – 4 для создания адресных шин координатной сетки (рис. 15.7).

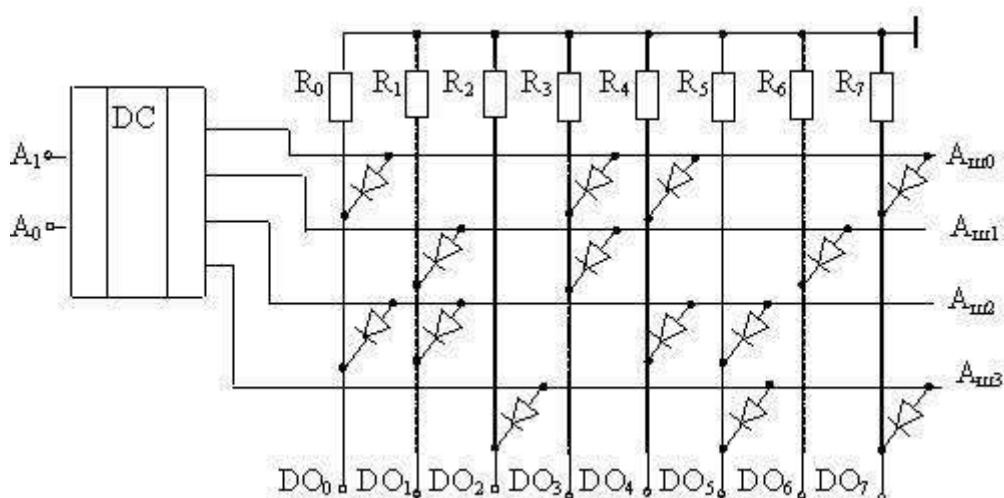


Рис. 15.7. Структурная схема масочного диодного ПЗУ

Масочные ПЗУ применяются для хранения информации, имеющей широкий круг потребителей. В частности, масочные ЗУ используют в качестве знакогенераторов кодов для букв различных алфавитов, как таблицы типовых функций и т.п.

Другим видом однократно программируемого ЗУ являются ЗУ типа PROM. Микросхемы PROM программируются удалением или созданием специальных перемычек. Принцип программирования похож на таковой для масочных ЗУ. В структурах с плавкими перемычками при программировании лишние перемычки удаляются путем расплавления импульсом тока. Плавкие перемычки (металлические или поликристаллические) включаются в цепи диодов или транзисторов.

В исходном состоянии запоминающий элемент хранит логическую единицу. После разрушения перемычки запоминающий элемент будет хранить логический нуль.

Схемы с создаваемыми перемычками в качестве исходных имеют непроводящие соединители в виде двух встречно включенных диодов либо тонкого диэлектрического слоя. При программировании импульсом повышенного напряжения в первом случае пробивается один из диодов, а во втором – диэлектрический слой, после чего в месте пробоя возникает проводящая перемычка. Принцип программирования в ЗУ типа PROM можно пояснить рис. 15.8.

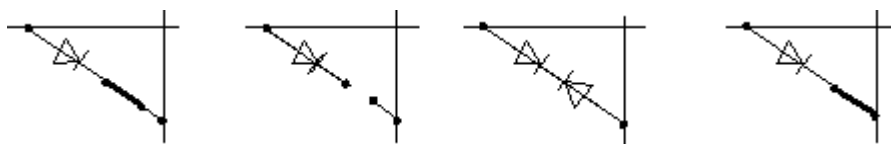


Рис. 15.8. Состояние соединений до и после программирования в структурах с удаляемыми и создаваемыми перемычками

ПЗУ типа ROM(M) и PROM после программирования становятся для потребителя постоянными в буквальном смысле, так как изменить их содержание нельзя. Более широкие возможности предоставляют ПЗУ, содержимое которых может изменять сам пользователь с помощью специального оборудования (программаторов). Различают несколько типов таких ПЗУ: EPROM, EEPROM, FLASH, в которых содержимое может быть изменено путем стирания старой информации и записи новой.

В ЗУ типа EPROM стирание выполняется ультрафиолетовым облучением кристалла в специальных устройствах, поэтому на русском языке такие ПЗУ носят название РПЗУ-УФ. В ЗУ типа EEPROM стирание производится электрическим сигналом, поэтому русское название таких микросхем – РПЗУ-ЭС (репрограммируемое ПЗУ с электрическим стиранием), либо ЭСППЗУ (электрически стираемое программируемое ПЗУ). Запись в EPROM и EEPROM производится электрическим сигналом. Следует заметить, что микросхемы EEPROM позволяют осуществить их программирование, не изымая микросхему из устройства, в котором они используются.

Флэш-память (ЗУ типа FLASH) по основным принципам работы подобна рассмотренным выше ЗУ. Запоминающие элементы памяти FLASH подобны применяемым в EPROM и EEPROM, но ЗУ типа FLASH имеют структурные и технологические особенности, существенно улучшающие общие свойства репрограммируемых ЗУ [20].

В РПЗУ носителем информации (запоминающим элементом) является МОП-транзистор, поэтому используются два вида запоминающих элементов на:

- МОП-транзисторах с плавающим затвором (в РПЗУ-УФ);
- МНОП (МНДП)-транзисторах (в РПЗУ-ЭС).

За счет этого обеспечивается возможность неоднократной записи и считывания информации. РПЗУ способны к многократному (от 25 до 10000 раз) перепрограммированию без потери работоспособности.

Это достигается применением «управляемых перемычек», функции которых выполняют МНОП-транзисторы и транзисторы n -МОП с плавающим затвором с использованием механизма лавинной инжекции заряда (ЛИЗМОП).

Виды структур элементов памяти РПЗУ – структуры транзисторов типа МНОП (МНДП) и ЛИЗМОП представлены на рис. 15.9.

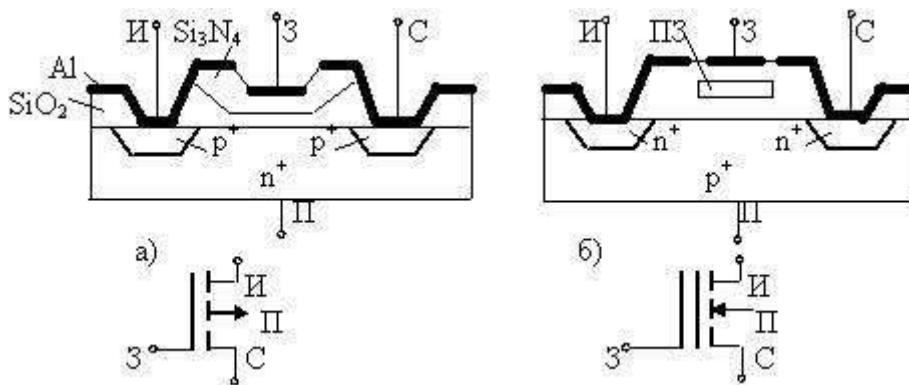


Рис. 15.9. Структура и условные обозначения полевых транзисторов:

а – типа МНОП, *б* – с двумя затворами (плавающим и управляющим)

В рассматриваемых структурах процесс программирования – это занесение заряда под затвор. Для этого, например, в транзисторах типа p -МОП между затвором и подложкой дается импульс напряжения отрицательной полярности с амплитудой 30 – 40 В. При этом под действием сильного электрического поля электроны преодолевают тонкий слой SiO_2 и скапливаются у границы слоя Si_3N_4 . Накопленный заряд снижает пороговое напряжение открытия транзистора, снижая сопротивление канала между истоком и стоком. Наличие заряда под затвором соответствует состоянию логической «1». Логическому «0» соответствует состояние транзистора без заряда в диэлектрике под затвором. Для того, чтобы этого достигнуть подают на затвор импульс положительной полярности с амплитудой (30 – 40) В. Электроны при этом вытесняются в подложку. Передаточная характеристика смещается в область высоких пороговых напряжений. Таким образом, вытеснение заряда из подзатворного диэлектрика – это *режим стирания*.

Режимы программирования и стирания можно осуществить с помощью напряжения одной полярности (отрицательной для p -МНОП, положительной для n -МНОП). В этом случае используется явление лавинной инжекции электронов под затвор, которая происходит, если (для p -МНОП) к истоку и стоку приложить импульс отрицатель-

ного напряжения (30 – 40) В, а затвор и подложку соединить с корпусом. В результате электрического пробоя переходов исток-подложка и сток-подложка происходит лавинное размножение электронов и инжекция некоторых из них, обладающих достаточной энергией, на границу между слоями диэлектрика. В результате происходит «запись единицы», т.е. снижение порогового напряжения открытия транзистора. Для стирания достаточно подать импульс отрицательного напряжения на затвор. При этом электроны вытесняются в подложку, что вызывает увеличение модуля порогового напряжения открытия транзистора (возникает состояние логического «0»).

В режиме считывания на затвор подают напряжение, значение которого лежит между двумя пороговыми уровнями. Если в запоминающий элемент была записана логическая «1», транзистор откроется, если логический «0» – нет.

Вариант элемента памяти (ЭП) по структуре ЛИЗМОП с двойным затвором (рис. 15.9, б) представляет собой *n*-МОП-транзистор, у которого в подзатворной области диэлектрика SiO₂ сформирована область из металла или поликристаллического кремния – «плавающий» затвор (ПЗ).

В режиме программирования на управляющий затвор, исток и сток подают напряжение (21 – 25) В положительной полярности. В обратно смещенных *p-n*-переходах возникает процесс лавинного размножения носителей заряда и часть электронов инжектируется в ПЗ. В результате накопления на ПЗ отрицательного заряда передаточная характеристика транзистора смещается в область высокого порогового напряжения (пороговое напряжение открытия транзистора увеличивается), что соответствует записи логического «0».

В режиме стирания происходит вытеснение заряда из области ПЗ: в РПЗУ-ЭС – электрическим сигналом, в РПЗУ-УФ – с помощью облучения ультрафиолетовыми лучами. В первом случае импульсом положительного напряжения, подаваемым на управляющий затвор, снимают заряд электронов с ПЗ, восстанавливая низкий уровень порогового напряжения, что соответствует состоянию логической «1». В структурах РПЗУ-УФ при облучении электроны рассасываются с ПЗ в подложку вследствие усиления теплового движения за счет энергии, полученной от источника УФ излучения. Режим считывания осуществляется также, как в ЭП на МНОП-структурах.

Режим хранения обеспечивается отсутствием напряжений на электродах ЭП с тем, чтобы исключить рассасывание заряда, имею-

щегося в диэлектрической среде. Время сохранения заряда для некоторых схем составляет от нескольких тысяч часов до нескольких лет. Например, микросхема РПЗУ-УФ типа К573РФ6 имеет гарантийный срок хранения информации без питания пять лет.

15.7. Структурная схема РПЗУ-ЭС (EPROM)

В РПЗУ-ЭС обеспечиваются четыре режима работы: *хранение, считывание, стирание, запись (программирование)*. Для выполнения этих режимов РПЗУ содержит все элементы, необходимые для работы микросхемы в качестве ПЗУ: матрицу элементов памяти (ЭП), дешифраторы кода адреса строк и столбцов, устройство ввода-вывода (УВВ), устройство управления. Кроме этих узлов в схеме имеются функциональные узлы, обеспечивающие работу схемы в режимах стирания и программирования (записи): селектор (блок ключей выбора столбцов), коммутаторы режимов и формирователи импульсов напряжения требуемой амплитуды и длительности из напряжения программирования U_{PR} (рис. 15.10). Сигналы управления имеют следующее назначение:

- PR – разрешение режима записи (программирования);
- RD – разрешение чтения (считывания);
- ER – разрешение стирания;
- CS – выбор микросхемы.

Селектор выбирает из 128-разрядного кода на своем входе восемь разрядов, выдаваемых на выход через УВВ. Селектором управляют четыре младшие разряда адресного кода, которые после дешифрации обеспечивают выборку одного восьмиразрядного слова из 16 слов, содержащихся в выбранной строке.

Многие микросхемы группы ЭС допускают адресное стирание (избирательное построчное стирание по адресу).

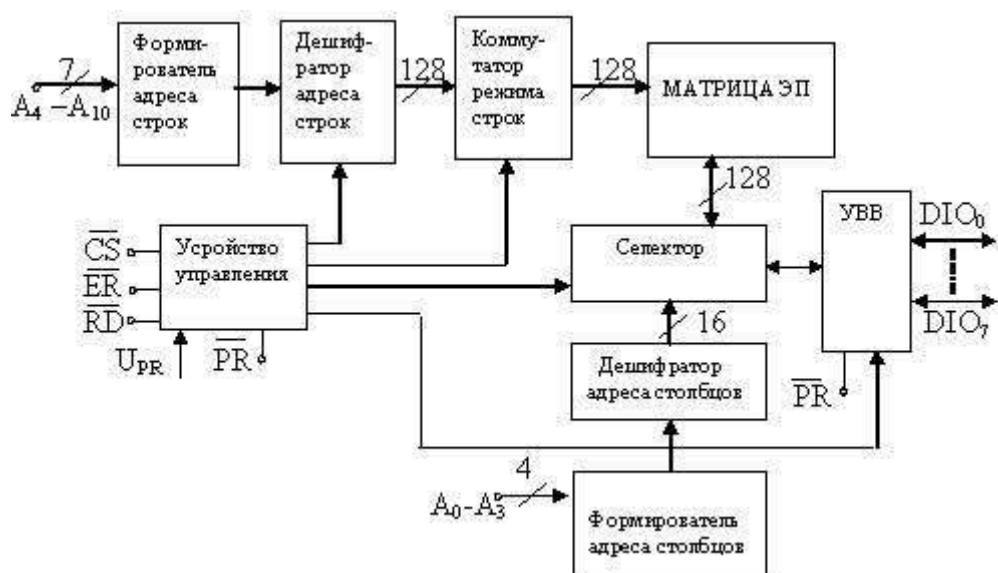


Рис. 15.10. Структурная схема репрограммируемого ПЗУ с электрической записью и стиранием (EEPROM) (микросхема КР1601РР3)

При эксплуатации микросхем РПЗУ необходимо обеспечить требуемый порядок включения и выключения напряжений питания и программирования. Например, для микросхемы КР1601РР3 в режиме программирования при включении вначале подают + 5 В, затем – 12 В и последним – напряжение программирования. При выключении последовательность меняется на противоположную.

15.8. Постоянные запоминающие устройства РПЗУ-УФ

РПЗУ-УФ имеют устройство и режимы работы похожие на рассмотренные выше, однако процесс стирания существенно отличается.

Для стирания микросхему нужно извлечь из контактного устройства, замкнуть все выводы полоской фольги и поместить под источник излучения, обеспечив охлаждение корпуса. Источники ультрафиолетового излучения – ртутные лампы и лампы с парами ртути в кварцевых баллонах: РДТ-220, ДРТ-375, ДБ-8, ДБ-60 и др. Время стирания 30 – 60 минут. Расстояние от корпуса до баллона лампы должно быть 2,5 см. Необходимо обеспечить чистоту стекла корпуса микросхемы, иначе стирание может быть неполным. Режимы работы обеспечивают сигналами управления подобными рассмотренным, однако у некоторых микросхем есть режим контроля записи, который

реализуется вслед за программированием. Группа м/схем РПЗУ-УФ в отечественной комплектации была представлена серией К573РФ [17]. Наиболее сложную структуру имеет микросхема К573РФ3 с организацией (4к · 16). Она имеет встроенные интерфейсные средства для обеспечения режима обмена со стандартной магистралью. Кроме того, у нее есть встроенное программируемое адресное устройство, которое позволяет без дополнительных средств объединять до восьми микросхем в блок ПЗУ.

15.9. Условные обозначения микросхем и сигналов управления запоминающими устройствами (примеры УГО ЗУ)

1. Микросхемы оперативных запоминающих устройств (ОЗУ) представлены на рис. 15.11.

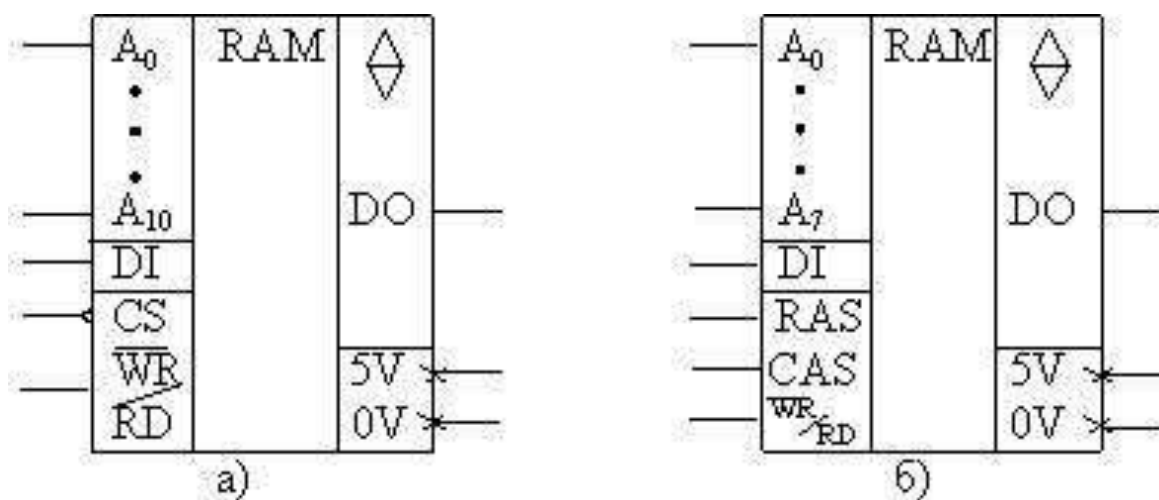


Рис. 15.11. Условные обозначения статического (а) и динамического (б) ОЗУ

2. Микросхемы постоянных запоминающих устройств (ПЗУ) представлены на рис. 15.12.

На рис. 15.11 и 15.12 изображены ЗУ со знаком на выходе микросхем. Этот знак показывает, что выходные цепи ЗУ выполнены по

схеме с третьим состоянием, т.е. на выходе информация появится только тогда, когда на входе CS будет установлен *активный уровень* сигнала.

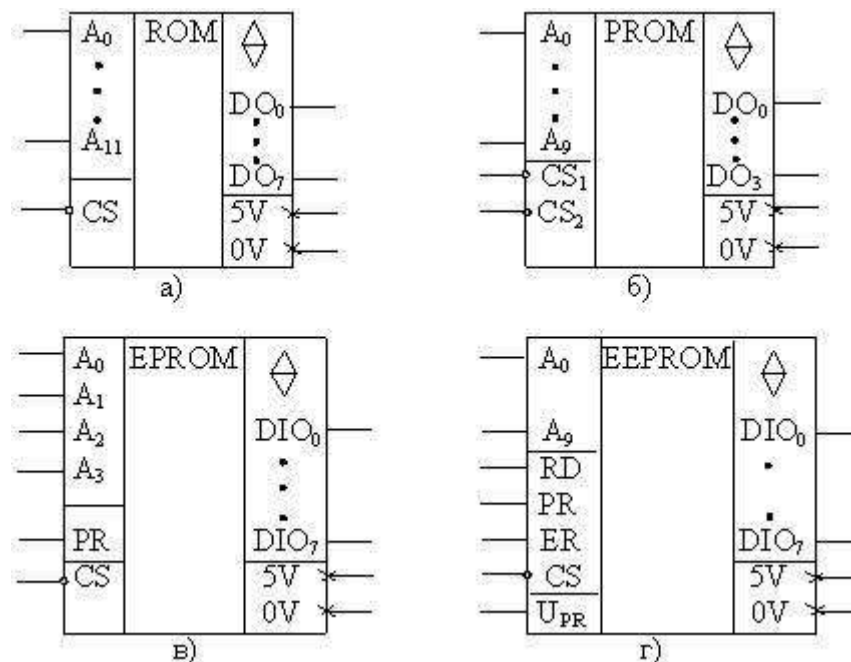


Рис. 15.12. Условные обозначения постоянных запоминающих устройств:

а – масочное ПЗУ; *б* – «прожигаемое» ПЗУ; *в* – репрограммируемое ПЗУ
со стиранием ультрафиолетовым излучением;
г – ПЗУ с электрическим стиранием

На выходе микросхемы могут быть изображены другие значки, указывающие тип выхода ЗУ:

- выход с 3-м состоянием;
- выходные цепи имеют открытый коллектор;
- выходные цепи имеют открытый эмиттер.

Обозначения сигналов и выводов микросхем ЗУ имеют следующий смысл:

$A_0 - A_n$ – обозначение адресных входов, номер соответствует разряду двоичного кода в адресном кодовом слове;

DI, DO – обозначение выводов входа и выхода данных;

$DIO_0 - DIO_n$ – обозначение выводов, которые могут быть либо входами, либо выходами данных, номер соответствует разряду двоичного кода в выходном кодовом слове;

CS – выбор микросхемы;

WR/RD – сигнал запись (считывание);

RAS – строб адреса строк;

CAS – строб адреса столбцов;

PR – сигнал программирования;
 U_{PR} – напряжение программирования;
 RD – сигнал считывания (чтения);
 ER – сигнал стирания.

15.10. Флэш-память

Флэш-память (Flash-Memory) по принципам работы и типу запоминающих элементов подобна ЗУ типа EEPROM с программированием МОП-транзисторов с плавающим затвором.

В схемах Flash данные стираются электрическими сигналами. За счет упрощения структуры и процедур стирания в схемах Flash достигается высокий уровень интеграции и быстродействия. Запоминание данных осуществляется с помощью зарядов-разрядов плавающих затворов матрицы МОП-транзисторов. Заряд производится с помощью лавинной инжекции электронов в область плавающего затвора, а при стирании используется туннелирование электронов через тонкий слой диэлектрика. При этом в качестве запоминающего элемента используются модифицированные МОП-транзисторы, например, МОП-транзисторы с многоуровневым хранением заряда, либо МОП-транзисторы с зеркальным битом [20].

Технологически проще выполняется структура МОП-транзистора с *зеркальным битом*. Основной структуры флэш-памяти является матрица запоминающих элементов из МОП-транзисторов на основе ячеек ИЛИ-НЕ либо И-НЕ (рис. 15.13).

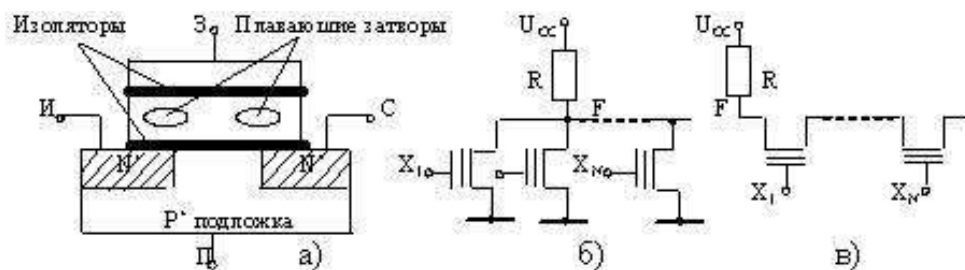


Рис. 15.13. Структура запоминающего элемента с зеркальным битом (а) и схемы ячеек ИЛИ-НЕ (б), И-НЕ (в)

В запоминающем элементе с зеркальным битом области истока и стока идентичны, а запоминающая область выполнена так, что

группы электронов (плавающие затворы) могут длительно храниться независимо друг от друга.

Структура микросхем Flash-памяти содержит матрицу ячеек логических элементов, построенных на запоминающих МНОП-транзисторах (рис. 15.13, б, в). Считается, что ячейки И-НЕ обеспечивают большую компактность, но имеют меньшее быстродействие по сравнению с ячейками ИЛИ-НЕ. Ячейки ИЛИ-НЕ обеспечивают более быстрый доступ к словам при произвольной выборке.

Структура матрицы накопителя Flash-памяти представлена на рис. 15.14.

В накопителе каждый столбец матрицы представляет собой совокупность параллельно соединенных МНОП-транзисторов. На словарные линии выборки (строки) в процессе выборки подают уровень напряжения, при котором транзисторы могут открыться (высокий логический уровень). Транзисторы невыбранных строк будут заперты. В выбранной строке откроются те транзисторы, в плавающих затворах которых отсутствует заряд электронов. Открывшиеся транзисторы передадут высокий логический уровень напряжения на разрядные линии считывания.

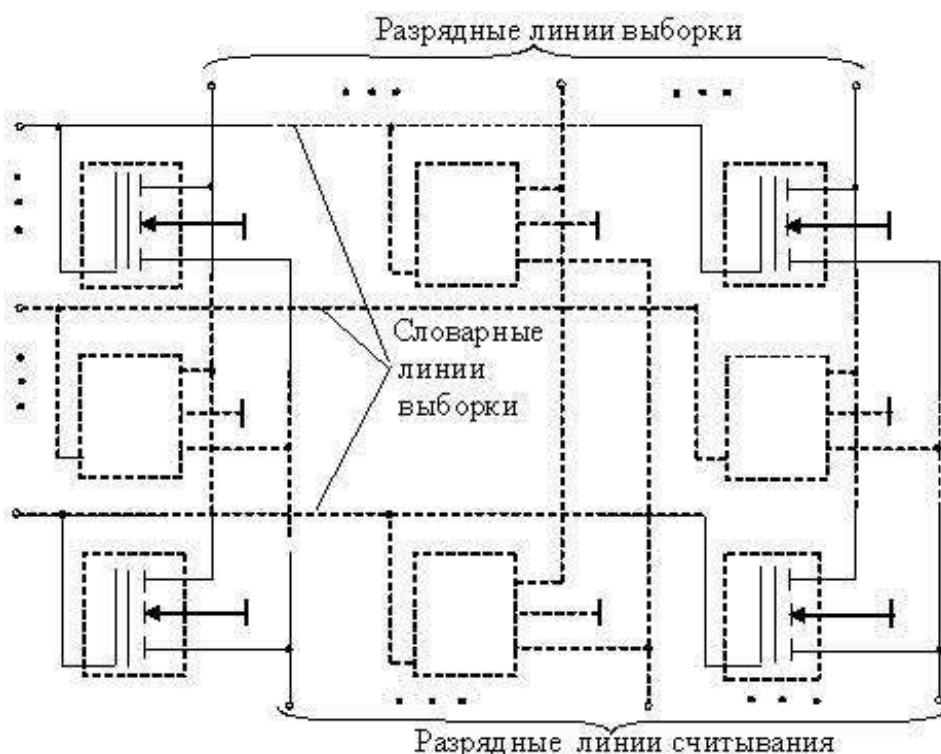


Рис. 15.14. Структура матрицы накопителя Flash-памяти на основе ячеек ИЛИ-НЕ

Управление микросхемами Flash-памяти имеет более сложный характер по сравнению с традиционным способом управления схема-

ми памяти с помощью адресных и управляющих сигналов. Flash-память имеет управление словами-командами, предварительно записанными в специальный внутренний командный регистр. Слова-команды имеют в своём составе команды, обеспечивающие подготовку и выполнение операций стирания, программирования и проверки, чтения и сброса.

Команда сброса является средством устранения действия команд стирания и программирования, что повышает надежность хранения информации.

Флэш-память имеет две разновидности, обусловленные двумя основными направлениями использования. Первая – хранение не очень часто изменяемых данных. Вторая – замена памяти на жёстких магнитных дисках. Микросхемы первого направления имеют блочную несимметричную структуру. В составе этих микросхем имеется так называемый загрузочный блок (Boot-блок), в котором информация надежно защищена аппаратными средствами от случайного стирания.

В Boot-блоке хранятся программы инициализации системы, позволяющие ввести её в работу после подачи питания. Микросхемы второго направления имеют блочную симметричную структуру с идентичными блоками и более развитые средства перезаписи информации. Такую Flash-память называют файловой. Она служит основным средством замены традиционного сочетания жёсткий диск + динамическое ОЗУ на Flash-память + статическое ОЗУ, что особенно эффективно в портативных компьютерах.

Пример условного обозначения (внешняя организация) файловой Flash-памяти показан на рис. 15.15 [20].

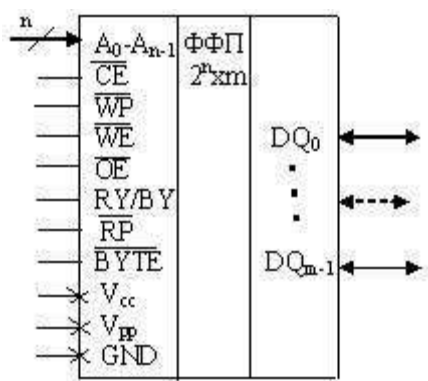


Рис. 15.15. Пример условного обозначения
микросхемы файловой флэш-памяти

Обозначения выводов и сигналов, показанных на рис. 15.15, имеют следующий смысл: A_0 – младший бит адреса, A_{n-1} – старший бит адреса, n – число разрядов адреса; DQ_0 – младший бит выходных данных; DQ_{m-1} – старший бит выходных данных на двунаправленной шине данных. Сигнал $\overline{CE}$ – разрешение (выбор) кристалла; $\overline{OE}$ – перевод (установка) выхода в третье состояние; сигнал $\overline{WE}$ управляет доступом к внутреннему автомату управления процессами стирания/(записи); сигнал $\overline{WP}$ – разрешение защиты записи в блоках (каждый блок имеет бит запрещения записи);

сигнал $\overline{RY/BY}$ – индицирует состояние внутреннего автомата записи; сигнал $\overline{RP}$ – установка режима малой мощности потребления; сигнал $\overline{BYTE}$ вводит схему либо в байтовый, либо в словарный режим.

Микросхемы файловой флэш-памяти в настоящее время имеют информационную ёмкость несколько Гбит при байтовой разрядности 8/16 бит и напряжении питания от 5 до 1,8 В.

16. НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

Перспективы и направления развития электроники зависят в первую очередь от научных достижений в области физики, химии, математики и техники полупроводников. Электроника, связанная с нарастающими информационными потоками, давно уже перешла в область микроэлектроники, где достигнуты впечатляющие успехи благодаря миниатюризации, снижению потребления энергии, повышению быстродействия, расширению функциональных возможностей электронных средств.

В настоящее время наблюдается переход от микроструктур к наноструктурам, что сулит дальнейшее увеличение степени интеграции полупроводниковых приборов и улучшение энергетических параметров базовых элементов электроники, в первую очередь транзисторов, а на их основе – всех других функциональных узлов электроники. По мнению ведущих ученых наноструктуры будут основной элементной базой в ближайшие 30 – 50 лет [23]. Следует при этом заметить, что технология изготовления наноструктурных электронных чипов существенно сложнее технологии изготовления микроструктурных чипов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якубовский, С.В. Аналоговые и цифровые интегральные схемы / С.В. Якубовский, Н.А. Барканов, Б.П. Кудряшов; под ред. С.В. Якубовского. – М.: Сов. радио, 1979. – 336 с.: ил.

2. Опадчий, Е.Ф. Аналоговая и цифровая электроника: учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; под ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 768 с.: ил.

3. Аллен, Ф. Электронные схемы с переключаемыми конденсаторами / Ф. Аллен, Э. Санчес-Синенсио. – М.: Мир, 1989. – 205 с.: ил.

4. Быстров, Ю.А. Электронные приборы для отображения информации / Ю.А. Быстров, И.И. Литвак, Г.М. Персианов. – М.: Радио и связь, 1985. – 240 с.: ил.

5. Будинский, Я. Логические цепи в цифровой технике / К. Юнга; под ред. Б.А. Калабекова; пер. с чешск. – М.: Связь, 1977. – 392 с.: ил.

6. Гутников, В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах учебное пособие / В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.: ил.

7. Гусев, В.Г. Электроника: учебное пособие для приборостроительных специальностей вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1991. – 662 с.: ил.

8. Ефимов, И.Е. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов. – М.: Высш. шк., 1986. – 464 с.: ил.

9. Жеребцов, И.П. Основы электроники / И.П. Жеребцов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.: ил.

10. Мулявка, Я. Схемы на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами / Я. Мулявка. – М.: Мир, 1992. – 205 с.: ил.

11. Основы теории цепей: учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.: ил.

12. Основы промышленной электроники: учебник для вузов / В.Г. Герасимов, О.М. Князьков, А.Е. Краснопольский, В.В. Сухоруков; под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.: ил.

13. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: справочник / А.В. Баюков, А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев и др.; под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 744 с.: ил.

14. Прянишников, В.А. Электроника: курс лекций / В.А. Прянишников. – СПб.: Корона принт, 1998. – 400 с.: ил.
15. Полупроводниковые приборы: Транзисторы: справочник / В.Л. Аронов, А.В. Баюков, А.А. Зайцев и др.; под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 904 с.: ил.
16. Проектирование радиоэлектронных устройств на интегральных микросхемах: учебное пособие для вузов / Под ред. С.Я. Шаца. – М.: Сов. радио, 1976. – 312 с.: ил.
17. Полупроводниковые БИС запоминающих устройств: справочник / В.В. Баранов, Н.В. Бекин, А.Ю. Гордонов и др.; под ред. А.Ю. Гордонова и Ю.Н. Дьякова. – М.: Радио и связь, 1987. – 360 с.: ил.
18. Степаненко, И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем учебник / И.П. Степаненко. – М.: Энергия, 1973. – 608 с.: ил.
19. Токхейм, Р. Основы цифровой электроники / Р. Токхейм; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 392 с.: ил.
20. Угрюмов, Е.П. Цифровая схемотехника: учебное пособие для вузов/ Е.П. Угрюмов.– СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.: ил.
21. Цыкин, Г.С. Электронные усилители / Г.С. Цыкин. – М.: Связь, 1965. – 511 с.: ил.
22. Шило, В.Л. Популярныe цифровые микросхемы: справочник / В.Л. Шило. – М.: Радио и связь, 1987. – 352 с.: ил.
23. Щука, А.А. Нанoeлектроника /А.А. Щука. – М.: Физматкнига, 2007. – 464 с.: ил.
24. Электротехника: программирование учебное пособие для не-электротехнических специальностей вузов / В.Г. Герасимов, Х.Э. Зайдель, В.В. Коген-Далин и др.; под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1983. – 480 с.: ил.
25. Электроника. Энциклопедический словарь / Гл. ред. В.Г. Колесников. – М.: Советская энциклопедия, 1991. – 688 с.: ил.
26. Ялышев, А.У. Многофункциональные аналоговые регулирующие устройства автоматики / А.У. Ялышев, О.И. Разорёнов. – М.: Машиностроение, 1981. – 399 с.: ил.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Б1.О.29 ОСНОВЫ РОССИЙСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОСТИ

Направление

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Авторы: Бачинин И.В. к.п.н, Старостин А.Н., к. ист. н.

Одобрены на заседании кафедры

Геологии

(название кафедры)

Зав. кафедрой

(подпись)

Бачинин И.В.

(Фамилия И.О.)

Протокол №1 от 14.09.2023

(Дата)

Рассмотрены методической комиссией

Горно-механического факультета

(название факультета)

Председатель

(подпись)

Осипов П.А.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 20.10.2023

(Дата)

Екатеринбург

Содержание

Методические указания по освоению дисциплины	3
Освоение лекционного курса	3
Самостоятельное изучение тем курса	3
Подготовка к практическим (семинарским) занятиям	6
Подготовка к тестированию	8
Подготовка к промежуточной аттестации	9

Методические указания по освоению дисциплины

Освоение лекционного курса

Лекции по дисциплине дают основной теоретический материал, являющийся базой для восприятия практического материала. После прослушивания лекции необходимо обратиться к рекомендуемой литературе, прочитать соответствующие темы, уяснить основные термины, проблемные вопросы и подходы к их решению, а также рассмотреть дополнительный материал по теме.

Главное в период подготовки к лекционным занятиям – научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения. Четкое планирование своего рабочего времени и отдыха является необходимым условием для успешной самостоятельной работы. В основу его нужно положить рабочие программы изучаемых в семестре дисциплин.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо распределять работу на завтрашний день. В конце каждого дня целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием успешной учебы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Одним из важных элементов освоения лекционного курса является самостоятельная работа на лекции. Слушание и запись лекций – сложный вид вузовской аудиторной работы. Внимательное слушание и конспектирование лекций предполагает интенсивную умственную деятельность студента. Краткие записи лекций, их конспектирование помогает усвоить учебный материал. Конспект является полезным тогда, когда записано самое существенное, основное и сделано это самим студентом. Не надо стремиться записать дословно всю лекцию. Такое «конспектирование» приносит больше вреда, чем пользы. Запись лекций рекомендуется вести по возможности собственными формулировками. Желательно запись осуществлять на одной странице, а следующую оставлять для проработки учебного материала самостоятельно в домашних условиях. Конспект лекции лучше подразделять на пункты, параграфы, соблюдая красную строку. Этому в большой степени будут способствовать пункты плана лекции, предложенные преподавателям. Принципиальные места, определения, формулы и другое следует сопровождать замечаниями «важно», «особо важно», «хорошо запомнить» и т.п. Можно делать это и с помощью разноцветных маркеров или ручек. Лучше если они будут собственными, чтобы не приходилось просить их у однокурсников и тем самым не отвлекать их во время лекции. Целесообразно разработать собственную «маркографию» (значки, символы), сокращения слов. Не лишним будет и изучение основ стенографии. Работая над конспектом лекций, всегда необходимо использовать не только учебник, но и ту литературу, которую дополнительно рекомендовал лектор. Именно такая серьезная, кропотливая работа с лекционным материалом позволит глубоко овладеть знаниями.

Самостоятельное изучение тем курса

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка основной и рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебниками и книгами (а также самостоятельное теоретическое исследование проблем, обозначенных

преподавателем на лекциях) – это важнейшее условие формирования научного способа познания. Основные приемы можно свести к следующим:

- составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;
- перечень должен быть систематизированным (что необходимо для семинаров, что для экзаменов, что пригодится для написания курсовых и выпускных квалификационных работ, а что выходит за рамки официальной учебной деятельности, и расширяет общую культуру);
- обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и дипломных работ это позволит экономить время);
- определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;
- при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями и научными руководителями, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;
- все прочитанные книги, учебники и статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»: можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);
- если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;
- следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать); Таким образом, чтение научного текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того на сколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьезный, кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением, содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студенты с этой целью заводят специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении научного текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);

- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить, как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);

- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);

- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к научному тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;

- просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;

- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц, цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;

- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;

- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым или, в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках учебной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с научным текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

- Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

- Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

- Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

- Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

- Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять

план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис - это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта - основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование - наиболее сложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

Подготовка к практическим (семинарским) занятиям

Важной формой самостоятельной работы студента является систематическая и планомерная подготовка к практическому (семинарскому) занятию. После лекции студент должен познакомиться с планом практических занятий и списком обязательной и дополнительной литературы, которую необходимо прочитать, изучить и законспектировать. Разъяснение по вопросам новой темы студенты получают у преподавателя в конце предыдущего практического занятия.

Подготовка к практическому занятию требует, прежде всего, чтения рекомендуемых источников и монографических работ, их реферирования, подготовки докладов и сообщений. Важным этапом в самостоятельной работе студента является повторение материала по конспекту лекции. Одна из главных составляющих внеаудиторной подготовки – работа с книгой. Она предполагает: внимательное прочтение, критическое осмысление содержания, обоснование собственной позиции по дискуссионным моментам, постановки интересующих вопросов, которые могут стать предметом обсуждения на семинаре.

В начале практического занятия должен присутствовать организационный момент и вступительная часть. Преподаватель произносит краткую вступительную речь, где формулируются основные вопросы и проблемы, способы их решения в процессе работы.

Практические занятия не повторяют, а существенно дополняют лекционные занятия, помогая студентам в подготовке к промежуточной аттестации. Практические занятия являются одной из важнейших форм обучения студентов: они позволяют студентам закрепить, углубить и конкретизировать знания по курсу, подготовиться к практической деятельности. В процессе работы на практических занятиях студент должен совершенствовать умения и навыки самостоятельного анализа источников и научной литературы, что необходимо для научно-исследовательской работы.

Практическое (семинарское) занятие — это одна из организационных форм познавательной деятельности обучающихся, позволяющая закрепить полученные ранее знания, восполнить недостающую информацию, сформировать умения решать проблемы, укрепить позиции, научить культуре ведения дискуссии. Тематика обсуждения выдается на первых занятиях. Подготовка осуществляется во внеаудиторное время. Регламент – 3-5 мин. на выступление. В оценивании результатов наравне с преподавателем принимают участие студенты группы.

Обсуждение проблемы (нравственной, политической, научной, профессиональной и др.) происходит коллективно, допускается корректная критика высказываний (мнений) своих сокурсников с обязательным приведением аргументов критики.

Участие каждого обучающегося в диалоге, обсуждении должно быть неформальным, но предметным.

1. Россия: географические факторы и природные богатства.

№ п/п	Вопросы	Код компетенции
1.	Анализ предпосылок и факторов становления российской государственности (исторических, социально-экономических, географических).	УК-5
2.	Природные ресурсы и национальные богатства России.	
3.	Культуры этносов России и их основные достижения.	
4.	Религии этносов России.	

2. Многообразие российских регионов

№ п/п	Вопросы	Код компетенции
1.	Российская Федерация: основные этапы становления современного государственного устройства.	УК-5
2.	Географическое, политическое, социально-экономическое, многообразие российских регионов.	
3.	Свердловская область: природно-экономический потенциал.	
4.	История родного города на примере города Екатеринбурга – столицы Татарстана.	

Результатом обсуждения проблемы на практическом (семинарском) занятии не могут быть однозначные выводы и формулировки. Действие его всегда пролонгировано,

что дает студентам возможность для дальнейшего обдумывания рассмотренных проблемных ситуаций, для поиска дополнительной информации по обсуждаемой теме.

Незадолго до проведения практического (семинарского) занятия преподаватель разделяет группу на несколько подгрупп, которая, согласно сценарию, будет представлять определенную точку зрения, информацию. При подготовке к групповой дискуссии студенту необходимо собрать материал по теме с помощью анализа научной литературы и источников.

Используя знание материала, исходя из изложенных изначальных концепций, каждая группа должна изложить свою точку зрения на обсуждаемый вопрос, подкрепив ее соответствующими аргументами.

Каждый из групп по очереди приводит аргументы в защиту своей позиции. Соответственно другая группа должна пытаться привести контраргументы, свидетельствующие о нецелесообразности, пагубности позиции предыдущей группы и стремится доказать, аргументированно изложить свою позицию.

Подготовка к тестированию

Тестирование - система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося.

Тестовая система предусматривает вопросы / задания, на которые слушатель должен дать один или несколько вариантов правильного ответа из предложенного списка ответов. При поиске ответа необходимо проявлять внимательность. Прежде всего, следует иметь в виду, что в предлагаемом задании всегда будет один правильный и один неправильный ответ. Это оговаривается перед каждым тестовым вопросом. Всех правильных или всех неправильных ответов (если это специально не оговорено в формулировке вопроса) быть не может. Нередко в вопросе уже содержится смысловая подсказка, что правильным является только один ответ, поэтому при его нахождении продолжать дальнейшие поиски уже не требуется.

На отдельные тестовые задания не существует однозначных ответов, поскольку хорошее знание и понимание содержащегося в них материала позволяет найти такие ответы самостоятельно. Именно на это слушателям и следует ориентироваться, поскольку полностью запомнить всю получаемую информацию и в точности ее воспроизвести при ответе невозможно. Кроме того, вопросы в тестах могут быть обобщенными, не затрагивать каких-то деталей.

Тестовые задания сгруппированы по темам учебной дисциплины. Количество тестовых вопросов/заданий по каждой теме дисциплины определено так, чтобы быть достаточным для оценки знаний обучающегося по всему пройденному материалу.

При подготовке к тестированию студенту следует внимательно перечитать конспект лекций, основную и дополнительную литературу по той теме (разделу), по которому предстоит писать тест.

Для текущей аттестации по дисциплине «Основы российской государственности» применяются тесты, которые выполняются по разделам № 1-5.

Образец тестового задания

1. Ключевую роль в формировании мировоззрения играют:

- мысли
- эмоции
- ценности
- все перечисленное

2. Какое место в мире по площади занимает Россия:

- первое

- второе
- третье
- пятое

3. К преимуществам географического положения России относят:

- межграничное положение между Европой и Азией
- большая протяженность транспортных магистралей
- сложность управления страной
- + выход к большому количеству морей и двум океанам

4. С каким государством у России самая большая сухопутная граница:

- Казахстан
- Белоруссия
- Китай
- Монголия

5. Первое летописное упоминание о Москве связано с именем князя:

- Ярослава Мудрого
- Владимира Мономаха
- Александра Невского
- Юрия Долгорукого

Подготовка к промежуточной аттестации

При подготовке к зачету по дисциплине «*Основы российской государственности*» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить информацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «*Основы российской государственности*».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во-первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью

построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому
комплексу _____ С.А. Упоров

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

ФТД.01 ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ТРУДА

Направление

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрена на заседании кафедры

Управления персоналом

(название кафедры)

Зав.кафедрой

(подпись)

Абрамов С.М.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 10.09.2023

(Дата)

Рассмотрена методической комиссией

Горно-механического факультета

(название факультета)

Председатель

(подпись)

Осипов П.А.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 20.10.2023

(Дата)

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ.....	6
САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ.....	8
ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ.....	12
ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ.....	13
ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ.....	28

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной и научной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества бакалавра и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знаний должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа – практические занятия;
2. внеаудиторная самостоятельная работа – подготовка к практическим занятиям (в т.ч. подготовка к практико-ориентированным заданиям и др.).

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине *«Технологии интеллектуального труда»* обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к сдаче зачета.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине *«Технологии интеллектуального труда»* являются:

- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);

- подготовка к практическим (семинарским) занятиям (в т.ч. ответы на вопросы для самопроверки, подготовка к выполнению практико-ориентированных заданий);
- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Особенности информационных технологий для людей с ограниченными возможностями.

Информационные технологии

Универсальный дизайн

Адаптивные технологии

Тема 2. Тифлотехнические средства/ Сурдотехнические средства/ Адаптивная компьютерная техника (Материал изучается по подгруппам в зависимости от вида ограничений здоровья обучающихся)

Брайлевский дисплей

Брайлевский принтер

Телевизионное увеличивающее устройство

Читающая машина

Экранные лупы

Синтезаторы речи

Ассистивные тифлотехнические средства

Ассистивные сурдотехнические средства

Адаптированная компьютерная техника

Ассистивные технические средства

Тема 3. Дистанционные образовательные технологии

Дистанционные образовательные технологии

Информационные объекты

Тема 4. Интеллектуальный труд и его значение в жизни общества

Система образования

Образовательная среда вуза

Интеллектуальный труд

Интеллектуальный ресурс

Интеллектуальный продукт

Тема 5. Развитие интеллекта – основа эффективной познавательной деятельности

Личностный компонент

Мотивационно-потребностный компонент

Интеллектуальный компонент

Организационно-деятельностный компонент

Гигиенический компонент

Эстетический компонент

Общеучебные умения

Саморегуляция

Тема 6. Самообразование и самостоятельная работа студента – ведущая форма умственного труда.

Самообразование

Самостоятельная работа студентов

Технологии интеллектуальной работы

Технологии групповых обсуждений

Тема 7. Технологии работы с информацией студентов с ОВЗ и инвалидов

Традиционные источники информации

Технологии работы с текстами

Технологии поиска, фиксирования, переработки информации

Справочно-поисковый аппарат книги

Техника быстрого чтения

Реферирование

Редактирование

Технология конспектирования

Методы и приемы скоростного конспектирования

Тема 8. Организация научно-исследовательской работы

Доклад

Реферат

Курсовая работа

Выпускная квалификационная работа

Техника подготовки работы

Методика работы над содержанием Презентация

Тема 9. Тайм-менеджмент

Время

Планирования времени

Приемы оптимизации распределения времени

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебными и научными изданиями профессиональной и общекультурной тематики – это важнейшее условие формирования научного способа познания.

Основные приемы работы с литературой можно свести к следующим:

- составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;
- перечень должен быть систематизированным;
- обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и выпускных квалификационных работ это позволит экономить время);
- определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;
- при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;
- все прочитанные монографии, учебники и научные статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»: можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);
- если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;
- следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать). Таким образом, чтение текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьезный, кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением,

содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студентам с этой целью рекомендуется заводить специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);
- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить, как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);
- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);
- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;
- просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;
- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц; цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;
- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;
- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым, или, в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной и научной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках образовательной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис - это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта - основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении

конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование – наиболее сложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ

Практико-ориентированные задания выступают средством формирования у студентов системы интегрированных умений и навыков, необходимых для освоения профессиональных компетенций. Это могут быть ситуации, требующие применения умений и навыков, специфичных для соответствующего профиля обучения (знания содержания предмета), ситуации, требующие организации деятельности, выбора её оптимальной структуры личностно-ориентированных ситуаций (нахождение нестандартного способа решения).

Кроме этого, они выступают средством формирования у студентов умений определять, разрабатывать и применять оптимальные методы решения профессиональных задач. Они строятся на основе ситуаций, возникающих на различных уровнях осуществления практики и формулируются в виде производственных поручений (заданий).

Под практико-ориентированными заданиями понимают задачи из окружающей действительности, связанные с формированием практических навыков, необходимых в повседневной жизни, в том числе с использованием элементов производственных процессов.

Цель практико-ориентированных заданий – приобретение умений и навыков практической деятельности по изучаемой дисциплине.

Задачи практико-ориентированных заданий:

- закрепление, углубление, расширение и детализация знаний студентов при решении конкретных задач;
- развитие познавательных способностей, самостоятельности мышления, творческой активности;
- овладение новыми методами и методиками изучения конкретной учебной дисциплины;
- обучение приемам решения практических задач;
- выработка способности логического осмысления полученных знаний для выполнения заданий;
- обеспечение рационального сочетания коллективной и индивидуальной форм обучения.

Важными отличительными особенностями практико-ориентированных задания от стандартных задач (предметных, межпредметных, прикладных) являются:

- значимость (познавательная, профессиональная, общекультурная, социальная) получаемого результата, что обеспечивает познавательную мотивацию обучающегося;
- условие задания сформулировано как сюжет, ситуация или проблема, для разрешения которой необходимо использовать знания из разных разделов основного предмета, из другого предмета или из жизни, на которые нет явного указания в тексте задания;

- информация и данные в задании могут быть представлены в различной форме (рисунок, таблица, схема, диаграмма, график и т.д.), что потребует распознавания объектов;

- указание (явное или неявное) области применения результата, полученного при решении задания.

Кроме выделенных четырех характеристик, практико-ориентированные задания имеют следующие:

1. по структуре эти задания – нестандартные, т.е. в структуре задания не все его компоненты полностью определены;

2. наличие избыточных, недостающих или противоречивых данных в условии задания, что приводит к объемной формулировке условия;

3. наличие нескольких способов решения (различная степень рациональности), причем данные способы могут быть неизвестны учащимся, и их требуется сконструировать.

При выполнении практико-ориентированных заданий следует руководствоваться следующими общими рекомендациями:

- для выполнения практико-ориентированного задания необходимо внимательно прочитать задание, повторить лекционный материал по соответствующей теме, изучить рекомендуемую литературу, в т.ч. дополнительную;

- выполнение практико-ориентированного задания включает постановку задачи, выбор способа решения задания, разработку алгоритма практических действий, программы, рекомендаций, сценария и т. п.;

- если практико-ориентированное задание выдается по вариантам, то получить номер варианта исходных данных у преподавателя; если нет вариантов, то нужно подобрать исходные данные самостоятельно, используя различные источники информации;

- для выполнения практико-ориентированного задания может использоваться метод малых групп. Работа в малых группах предполагает решение определенных образовательных задач в рамках небольших групп с последующим обсуждением полученных результатов. Этот метод развивает навыки сотрудничества, достижения компромиссного решения, аналитические способности.

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ

1. В соответствии с опросником «Саморегуляция» (ОС) (модификация методики А.К. Осницкого) оцените свои качества, возможности, отношение к деятельности в протоколе (132 высказывания) по 4-х бальной шкале: 4 балла – да; 3 балла – пожалуй да; 2 балла – пожалуй нет; 1 балл – нет.

Текст опросника

1. Способен за дело приниматься без напоминаний.
2. Планирует, организует свои дела и работу.
3. Умеет выполнить порученное задание.
4. Хорошо анализирует условия.
5. Учитывает возможные трудности.
6. Умеет отделять главное от второстепенного.
7. Чаще всего избирает верный путь решения задачи.
8. Правильно планирует свои занятия и работу.
9. Пытается решить задачи разными способами.
10. Сам справляется с возникающими трудностями.
11. Редко ошибается, умеет оценить правильность действий.
12. Быстро обнаруживает свои ошибки.
13. Быстро находит новый способ решения.
14. Быстро исправляет ошибки.
15. Не повторяет ранее сделанных ошибок.
16. Продумывает свои дела и поступки.
17. Хорошо справляется и с трудными заданиям.
18. Справляется с заданиями без посторонней помощи.
19. Любит порядок.
20. Заранее знает, что будет делать.
21. Аккуратен и последователен.
22. Продумывает, все до мелочей.
23. Ошибается чаще из-за того, что смысл задания целом не понят, хотя все детали продуманы.
24. Старателен, хотя часто не выполняет заданий.
25. Долго готовится, прежде чем приступить к делу.
26. Избегает риска.
27. Сначала обдумывает, потом делает.
28. Решения принимает без колебаний.
29. Уверенный в себе.
30. Действует решительно, настойчив.
31. Предприимчивый, решительный.
32. Активный.
33. Ведущий.
34. Реализует почти все, что планирует.
35. Начатое дело доводит до конца.
36. Предпочитает действовать, а не обсуждать.

37. Обдумывает свои дела и поступки.
38. Анализирует свои ошибки и неудачи.
39. Планирует дела, рассчитывает свои силы.
40. Прислушивается к замечаниям.
41. Редко повторяет одну и ту же ошибку.
42. Знает о своих недостатках.
43. Сделает задание на совесть.
44. Как всегда сделает на отлично.
45. Для него важно качество, а не отметка.
46. Всегда проверяет правильность работы.
47. Старается довести дело до конца.
48. Стирается добиться лучших результатов.
49. Действует самостоятельно, мало советуясь с другими.
50. Предпочитает справляться с трудностями сам.
51. Может принять не зависящее от других решение.
52. Любит перемену в занятиях.
53. Легко переключается с одной работы на другую.
54. Хорошо ориентируется в новых условиях.
55. Аккуратен.
56. Внимателен.
57. Усидчив.
58. С неудачами и ошибками обычно справляется.
59. Неудачи активизируют его.
60. Старается разобраться в причинах неудач.
61. Умеет мобилизовать усилия.
62. Взвешивает все «за» и «против».
63. Старается придерживаться правил.
64. Всегда считается с мнением других.
65. Его нетрудно убедить в чем-то.
66. Прислушивается к замечаниям.
67. Нужно напоминать о том, что необходимо закончить дело.
68. Не планирует, мало организует свои дела, и работу.
69. Не выполняет заданий оттого, что отвлекается.
70. Условия анализирует плохо.
71. Не учитывает возможных трудностей.
72. Не умеет отделять главное от второстепенного.
73. Пути решения выбирает не лучшие.
74. Не умеет планировать работу и занятия.
75. Не пытается решать задачи разными способами.
76. Не может справиться с трудностями без помощи других.
77. Часто допускает ошибки в работе, часто их повторяет.
78. С трудом находит ошибки в своей работе.
79. С трудом находит новые способы решения.
80. С большим трудом и долго исправляет ошибки.

81. Повторяет одни и те же ошибки.
82. Часто поступает необдуманно, импульсивно.
83. С трудными заданиями справляется плохо.
84. Не справляется с заданием без напоминаний и помощи.
85. Не любит порядок.
86. Часто не знает заранее, что ему предстоит делать.
87. Непоследователен и неаккуратен.
88. Ограничивается лишь общими сведениями, общим впечатлением.
89. Ошибается чаще из-за того, что не продуманы мелочи, детали.
90. Не очень старателен, но задания выполняет.
91. Приступает к делу без подготовки.
92. Часто рискует, ищет приключений.
93. Сначала сделает, лотом подумает.
94. Решения принимает после раздумий и колебаний.
95. Часто сомневается в своих силах.
96. Нерешителен, небольшие помехи уже останавливают его.
97. Нерешительный.
98. Вялый, безучастный.
99. Ведомый.
100. Задумывает много, а делает мало.
101. Редко, когда начатое дело доводит до конца.
102. Предпочитает обсуждать, а не действовать.
103. Действует без раздумий, «с ходу».
104. Не анализирует ошибок.
105. Не планирует почти ничего, не рассчитывает своих сил.
106. Не прислушивается к замечаниям.
107. Часто повторяет одну и ту же ошибку.
108. Не хочет знать и исправлять свои недостатки.
109. Сделает «спустя рукава».
110. Сделает как получится.
111. Сделает из-за угрозы получения плохой оценки.
112. Не проверяет правильность результатов своих действий.
113. Часто бросает работу, не доделав ее.
114. Результат неважен – лишь бы поскорее закончить работу.
115. О его трудностях и делах знают почти все.
116. Всегда надеется на друзей, на их помощь.
117. Действует по принципу: как все, так и я!
118. Любит однообразные занятия.
119. С трудом переключается с одной работы на другую.
120. Плохо ориентируется в новых условиях.
121. Неаккуратен.
122. Невнимателен.
123. Неусидчив.
124. Ошибку может исправить, если его успокоить.

125. Неудачи быстро сбивают с толку.
126. Равнодушен к причинам неудач.
127. С трудом мобилизуется на выполнение задания.
128. Поступает необдуманно, импульсивно.
129. Не придерживается правил.
130. Не считается с мнением окружающих.
131. Его трудно убедить в чем-либо.
132. Не прислушивается к замечаниям.

Ключ для обработки и интерпретации данных

В тесте оценивается 132 характеристики саморегуляции. Они разбиты на тройки.

Всего 22 пары противоположных характеристик.

1. Целеполагание - 23. Неустойчивость целей.
2. Моделирование условий - 24. Отсутствие анализа условий.
3. Программирование действий - 25. Спонтанность действий.
4. Оценивание результатов - 26. Ошибки в работе.
5. Коррекции результатов и способ» действий - 27. Повторные ошибки.
6. Обеспеченность регуляции в целом - 28. Импульсивность.
7. Упорядоченность деятельности - 29. Непоследовательность, неаккуратность.
8. Детализация регуляции действий - 30. Поверхностность.
9. Осторожность в действиях - 31. Необдуманность, рискованность.
10. Уверенность в действиях - 32. Неуверенность в своих силах.
11. Инициативность в действиях - 33. Нерешительность.
12. Практическая реализуемость намерений - 34. Незавершенность дел.
13. Осознанность действий - 35. Действия наобум.
14. Критичность в делах и поступках -36. Равнодушие к недостаткам.
15. Ориентированность на оценочный балл -37. Попустительство.
16. Ответственность в делах и поступках - 38. Безответственность в делах.
17. Автономность - 39. Зависимость в действиях.
18. Гибкость, пластичность в действиях - 40. Инертность в работе.
19. Вовлечение полезных привычек в регуляцию действий - 41. «Плохиш».
20. Практичность, устойчивость в регуляции действий - 42. Равнодушие к ошибкам, неудачам.
21. Оптимальность (адекватность) регуляции усилий - 43. Отсутствие последовательности.
22. Податливость воспитательным воздействиям - 44. Самодостаточность.

Необходимо найти сумму в каждой из троек характеристик и сопоставить ее с их противоположностью.

4-6 баллов - слабое проявление характеристики.

7-9 баллов - ситуативное проявление.

10-12 баллов - выраженность характеристики.

Бланк для ответов

ФИ _____
 Пол _____ Возраст (дата рождения) _____ Гр. _____ Дата _____ № _____

Шкала ответов

4 – да; 3 – пожалуй да; 2 – пожалуй нет; 1 – нет.

№			S		№	
1	1			23	67	
	2				68	
	3				69	
2	4			24	70	
	5				71	
	6				72	
3	7			25	73	
	8				74	
	9				75	
4	10			26	76	
	11				77	
	12				78	
5	13			27	79	
	14				80	
	15				81	
6	16			28	82	
	17				83	
	18				84	
7	19			29	85	
	20				86	
	21				87	
8	22			30	88	
	23				89	
	24				90	
9	25			31	91	
	26				92	
	27				93	

S

10	28			32	94	
	29				95	
	30				96	
11	31			33	97	
	32				98	
	33				99	
12	34			34	100	
	35				101	
	36				102	
13	37			35	103	
	38				104	
	39				105	
14	40			36	106	
	41				107	
	42				108	
15	43			37	109	
	44				ΠΟ	
	45				111	
16	46			38	112	
	47				113	
	48				114	
17	49			39	115	
	50				116	
	51				117	
18	52			40	118	
	53				119	
	54				120	
19	55			41	121	
	56				122	
	57				123	
20	58			42	124	
	59				125	
	60				126	

21	61			43	127	
	62				128	
	63				129	
22	64			44	130	
	65				131	
	66				132	

Качественные характеристики саморегуляции

№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции	№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции
1	Целеполагание	За дело приниматься без напоминаний, планирует, организует свои дела и работу. Задания и поручения выполняет.	23	Неустойчивость целей	Не планирует, мало организует свою работу. Нужно напоминать о том, что необходимо закончить дело. Отвлекается.
2	Моделирование условий	Анализирует условия предстоящей деятельности, возможные трудности. Выделяет главное.	24	Отсутствие анализа условий	Не умеет отделять главное от второстепенного. Не предвидит ход дел, возможные трудности.
3	Программирование действий	Правильно планирует свои занятия и работу, избирает верный путь решения задачи.	25	Спонтанность действий	Не умеет планировать работу в занятия, затрудняется в выборе путей решения задач.
4	Оценивание результатов	Редко ошибается, умеет оценить правильность действий. Быстро обнаруживает свои ошибки.	26	Ошибки в работе	Часто допускает ошибки в работе, часто их повторяет. Не находит ошибок в своей работе.
5	Коррекция результатов и способов действий	Быстро находит новый способ решения. Быстро исправляет ошибки.	27	Повторные ошибки	С трудом находит новые способы решения. Повторяет одни и те же ошибки.
6	Обеспеченность регуляции в целом	Продумывает свои дела и поступки. Справляется с заданиями без посторонней помощи.	28	Импульсивность	Часто поступает необдуманно, импульсивно. С трудными заданиями справляется плохо.

№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции	№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции
		щи.			
7	Упорядоченность деятельности	Любит порядок. Аккуратен и последователен.	29	Непоследовательность	Часто не знает заранее, что ему предстоит делать, непоследователен и неаккуратен.
8	Детализация регуляции действий	Продумывает, все до мелочей. Ошибается чаще из-за того, что смысл задания целом не понят, хотя все детали продуманы.	30	Поверхностность	Ограничивается лишь общими сведениями, общим впечатлением. Ошибается чаще из-за того, что не продуманы мелочи, детали.
9	Осторожность в действиях	Долго обдумывает и готовится, прежде чем приступить к делу. Избегает риска.	31	Необдуманность, рискованность	Приступает к делу без подготовки. Сначала делает, лотом подумает.
10	Уверенность в действиях	Уверенный в себе. Решения принимает без колебаний. Решителен. Настойчив.	32	Неуверенность в своих силах	Решения принимает после колебаний. Сомневается в своих силах. Нерешителен.
11	Инициативен в действиях.	Предприимчивый, решительный. Активный. Ведущий.	33	Нерешительность	Нерешительный. Вялый, безучастный. Ведомый.
12	Практическая реализуемость намерений	Реализует почти все, что планирует. Начатое дело доводит до конца.	34	Незавершенность дел	Редко, когда начатое дело доводит до конца. Предпочитает обсуждать, а не действовать.
13	Осознанность действий	Обдумывает, планирует свои дела и поступки. Анализирует свои ошибки и неудачи.	35	Действия наобум	Действует без раздумий, «с ходу», не рассчитывает своих сил.
14	Критичность в делах и поступках	Знает о своих недостатках. Редко повторяет ошибки. Прислушивается к замечаниям.	36	Равнодушие к недостаткам	Часто повторяет одну и ту же ошибку. Не хочет знать и исправлять свои недостатки.

№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции	№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции
15	Ориентированность на оценочный балл	Сделает задание на совесть. Для него важно качество, а не отметка.	37	Попустительство	Делает все «спустя рукава», как получится. Делает из-за угрозы плохой оценки.
16	Ответственность в делах и поступках	Гарантирует доведение дел до конца. Всегда проверяет правильность работы.	38	Безответственность в делах	Не проверяет результатов своих действий. Часто бросает работу, не доделав до конца.
17	Автономность	Действует и принимает самостоятельные решения. Предпочитает сам справляться с трудностями.	39	Зависимость в действиях	Всегда надеется на друзей, на их помощь.
18	Гибкость, пластичность в действиях	Легко переключается с одной работы на другую. Хорошо ориентируется в новых условиях.	40	Инертность в работе	Любит однообразные занятия. С трудом переключается с одной работы на другую.
19	Вовлечение полезных привычек в регуляцию действий	Аккуратен. Внимателен. Усидчив.	41	«Плохиш»	Неаккуратен. Невнимателен. Неусидчив.
20	Практичность, устойчивость в регуляции действий	Справляется с неудачами и ошибками. Неудачи активизируют его. Старается разобраться в их причинах.	42	Равнодушие к ошибкам, неудачам	Неудачи быстро сбивают с толку. Равнодушен к их причинам.
21	Оптимальность (адекватность) регуляции усилий	Взвешивает все «за» и «против». Умеет мобилизовать усилия.	43	Отсутствие последовательности	Поступает необдуманно. С трудом мобилизуется на выполнение задания.
22	Податливость воспитательным воздействиям	Всегда считается с мнением других. Прислушивается к замечаниям.	44	Самодостаточность	Не считается с мнением окружающих. Не прислушивается к замечаниям.

Задание: На основе самодиагностики саморегуляции сформулируйте рекомендации по саморегуляции.

2. Выберите научную статью по своей специальности и напишите к ней аннотацию, реферат, конспект, рецензию.

Методические указания

АННОТАЦИЯ (от лат. *annotatio* - замечание, пометка) – это краткая характеристика статьи, рукописи, книги, в которой обозначены тема, проблематика и назначение издания, а также содержатся сведения об авторе и элементы оценки книги.

Перед текстом аннотации даются выходные данные (автор, название, место и время издания). Эти данные можно включить в первую часть аннотации.

Аннотация обычно состоит из двух частей. В первой части формулируется основная тема книги, статьи; во второй части перечисляются (называются) основные положения. Говоря схематично, аннотация на книгу (прежде всего научную или учебную) отвечает на вопросы о чем? из каких частей? как? для кого? Это ее основные, стандартные смысловые элементы. Каждый из них имеет свои языковые средства выражения.

Аннотация на книгу помещается на оборотной стороне ее титульного листа и служит (наряду с ее названием и оглавлением) источником информации о содержании работы. Познакомившись с аннотацией, читатель решает, насколько книга может быть ему нужна. Кроме того, умение аннотировать прочитанную литературу помогает овладению навыками реферирования.

Языковые стереотипы, с помощью которых оформляется каждая смысловая часть аннотации:

1. Характеристика содержания текста:

В статье (книге) рассматривается...; Статья посвящена...; В статье даются...; Автор останавливается на следующих вопросах...; Автор затрагивает проблемы...; Цель автора – объяснить (раскрыть)...; Автор ставит своей целью проанализировать...;

2. Композиция работы:

Книга состоит из ... глав (частей)...; Статья делится на ... части; В книге выделяются ... главы.

3. Назначение текста:

Статья предназначена (для кого; рекомендуется кому)...; Сборник рассчитан...; Предназначается широкому кругу читателей...; Для студентов, аспирантов...; Книга заинтересует...

РЕФЕРАТ (от лат. *referre* - докладывать, сообщать) – это композиционно организованное, обобщенное изложение содержания источника информации (статьи, ряда статей, монографии и др.). Реферат отвечает на вопрос: «Какая информация содержится в первоисточнике, что излагается в нем?»

Реферат состоит из трех частей: общая характеристика текста (выходные данные, формулировка темы); описание основного содержания; выводы референта. Изложение одной работы обычно содержит указание на тему и композицию реферируемой работы, перечень ее основных положений с приведением аргументации, реже - описание методики и проведение эксперимента, результатов и выводов исследования. Такой реферат называется про-

стым информационным. Студенты в российских вузах пишут рефераты обычно на определенные темы. Для написания таких тематических рефератов может быть необходимо привлечение более чем одного источника, по крайней мере двух научных работ. В этом случае реферат является не только информационным, но и обзорным.

Реферирование представляет собой интеллектуальный творческий процесс, включающий осмысление текста, аналитико-синтетическое преобразование информации и создание нового текста. Реферат не должен превращаться в «ползание» по тексту. Цель реферирования – создать «текст о тексте». Реферат – это не конспект, разбавленный «скрепами» типа *далее автор отмечает...* Обильное цитирование превращает реферат в конспект. При чтении научного труда важно понять его построение, выделить смысловые части (они будут основой для плана), обратить внимание на типичные языковые средства (словосочетания, вводные конструкции), характерные для каждой части. В реферате должны быть раскрыты проблемы и основные положения работы, приведены доказательства этих положений и указаны выводы, к которым пришел автор. Реферат может содержать оценочные элементы, например: *нельзя не согласиться, автор удачно иллюстрирует* и др. Обратите внимание, что в аннотации проблемы научного труда лишь обозначаются, а в реферате – раскрываются.

Список конструкций для реферативного изложения:

Предлагаемая вниманию читателей статья (книга, монография) представляет собой детальное (общее) изложение вопросов...; Рассматриваемая статья посвящена теме (проблеме, вопросу...);

Актуальность рассматриваемой проблемы, по словам автора, определяется тем, что...; Тема статьи (вопросы, рассматриваемые в статье) представляет большой интерес...; В начале статьи автор дает обоснование актуальности темы (проблемы, вопроса, идеи); Затем дается характеристика целей и задач исследования (статьи);

Рассматриваемая статья состоит из двух (трех) частей...; Автор дает определение (сравнительную характеристику, обзор, анализ)...; Затем автор останавливается на таких проблемах, как...; Автор подробно останавливается на истории возникновения (зарождения, появления, становления)...; Автор подробно (кратко) описывает (классифицирует, характеризует) факты...; Автор доказывает справедливость (опровергает что-либо)...; Автор приводит доказательства справедливости своей точки зрения...; В статье дается обобщение..., приводятся хорошо аргументированные доказательства...;

В заключение автор говорит о том, что...; Несомненный интерес представляют выводы автора о том, что...; Наиболее важными из выводов автора представляются следующие...; Изложенные (рассмотренные) в статье вопросы (проблемы) представляют интерес не только для..., но и для...

КОНСПЕКТИРОВАНИЕ – письменная фиксация основных положений читаемого или воспринимаемого на слух текста. При конспектировании происходит свертывание, компрессия первичного текста.

КОНСПЕКТ- это краткое, но связное и последовательное изложение значимого содержания статьи, лекции, главы книги, учебника, брошюры. Запись-конспект позволяет восстановить, развернуть с необходимой полнотой исходную информацию, поэтому при конспектировании надо отбирать новый и важный материал и выстраивать его в соответствии с логикой изложения. В конспект заносят основные (существенные) положения, а также фактический материал (цифры, цитаты, примеры). В конспекте последующая мысль должна вытекать из предыдущей (как в плане и в тезисах). Части конспекта должны быть связаны внутренней логикой, поэтому важно отразить в конспекте главную мысль каждого абзаца. Содержание абзаца (главная мысль) может быть передано словами автора статьи (возможно сокращение высказывания) или может быть изложено своими словами более обобщенно. При конспектировании пользуются и тем и другим приемом, но важно передать самые главные положения автора без малейшего искажения смысла.

Различают несколько видов конспектов в зависимости от степени свернутости первичного текста, от формы представления основной информации:

1. конспект-план;
2. конспект-схема;
3. текстуальный конспект.

Подготовка конспекта включает следующие этапы:

1. Вся информация, относящаяся к одной теме, собирается в один блок – так выделяются смысловые части.
2. В каждой смысловой части формулируется тема в опоре на ключевые слова и фразы.
3. В каждой части выделяется главная и дополнительная по отношению к теме информация.
4. Главная информация фиксируется в конспекте в разных формах: в виде тезисов (кратко сформулированных основных положений статьи, доклада), выписок (текстуальный конспект), в виде вопросов, выявляющих суть проблемы, в виде назывных предложений (конспект-план и конспект-схема).
5. Дополнительная информация приводится при необходимости.

РЕЦЕНЗИЯ - это письменный критический разбор какого-либо произведения, предполагающий, во-первых, комментирование основных положений (толкование авторской мысли; собственное дополнение к мысли, высказанной автором; выражение своего отношения к постановке проблемы и т.п.); во-вторых, обобщенную аргументированную оценку, в третьих, выводы о значимости работы.

В отличие от рецензии **ОТЗЫВ** дает самую общую характеристику работы без подробного анализа, но содержит практические рекомендации: анализируемый текст может быть принят к работе в издательстве или на соискание ученой степени.

Типовой план для написания рецензии и отзывов:

1. Предмет анализа: *В работе автора...; В рецензируемой работе...; В предмете анализа...*

2. Актуальность темы: Работа посвящена актуальной теме...; Актуальность темы обусловлена...; Актуальность темы не вызывает сомнений (вполне очевидна)...

3. Формулировка основного тезиса: Центральным вопросом работы, где автор добился наиболее существенных (заметных, ощутимых) результатов, является...; В работе обоснованно на первый план выдвигается вопрос о...

4. Краткое содержание работы.

5. Общая оценка: Оценивая работу в целом...; Таким образом, рассматриваемая работа...; Автор проявил умение разбираться в...; систематизировал материал и обобщил его...; Безусловной заслугой автора является новый методический подход (предложенная классификация, некоторые уточнения существующих понятий); Автор, безусловно, углубляет наше представление об исследуемом явлении, вскрывает новые его черты...

6. Недостатки, недочеты: Вместе с тем вызывает сомнение тезис о том...; К недостаткам (недочетам) работы следует отнести допущенные автором длинноты в изложении (недостаточную ясность при изложении)...; Работа построена нерационально, следовало бы сократить...; Существенным недостатком работы является...; Отмеченные недостатки носят чисто локальный характер и не влияют на конечные результаты работы...; Отмеченные недочеты работы не снижают ее высокого уровня, их скорее можно считать пожеланиями к дальнейшей работе автора...; Упомянутые недостатки связаны не столько с..., сколько с...

7. Выводы: Представляется, что в целом работа... имеет важное значение...; Работа может быть оценена положительно, а ее автор заслуживает...; Работа заслуживает высокой (положительной, отличной) оценки...; Работа удовлетворяет всем требованиям..., а ее автор, безусловно, имеет (определенное, законное, заслуженное, безусловное) право...

Задание

а) Выберите научную статью по своей специальности и напишите к ней аннотацию, реферат, конспект, рецензию.

3. Проанализируйте отрывок из студенческой курсовой работы, посвященной проблеме связи заголовка и текста. Соответствует ли язык сочинения нормам научного стиля? На основании анализа проведите правку текста:

Заголовок, будучи неотъемлемой частью газетных публикаций, определяет лицо всей газеты. Сталкиваясь с тем или иным периодическим изданием, читатель получает первую информацию о нем именно из заголовков. На примере газеты «Спорт – экспресс» за апрель – май 1994 г. я рассмотрю связь: заголовок – текст, ведь, как говорится в народной мудрости «встречают по одежке, а провожают – по уму». Но даже при наличии прекрасной одежки (заглавий) и величайшего ума (самих материалов) стилистическая концепция газеты будет не полной, если будет отсутствовать продуманная и логичная связь между содержанием и заголовком. Итак, стараясь выбрать наиболее продуманные заглавия,

я попытаюсь проследить за тем, по какому принципу строится связь между содержанием и заголовком самой популярной спортивной газеты России «Спорт – экспресс». А к тому же я остановлюсь и на классификации заголовков по типу их связей с газетным текстом вообще.

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к *зачету* по дисциплине «*Технологии интеллектуального труда*» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить информацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «*Технологии интеллектуального труда*».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во-первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому
комплексу _____ С.А. Упоров

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

ФТД.02 СРЕДСТВА КОММУНИКАЦИИ В УЧЕБНОЙ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Направление

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрена на заседании кафедры

Управления персоналом

(название кафедры)

Зав.кафедрой

(подпись)

Абрамов С.М.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 10.09.2023

(Дата)

Рассмотрена методической комиссией

Горно-механического факультета

(название факультета)

Председатель

(подпись)

Осипов П.А.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 20.10.2023

(Дата)

Екатеринбург

Автор: Полянок О.В., к.пс.н.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ.....	6
САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ.....	8
ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ.....	12
ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ.....	14
ПОДГОТОВКА РЕФЕРАТА.....	36
ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ.....	45

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной и научной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества бакалавра и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знаний должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа – практические занятия;
2. внеаудиторная самостоятельная работа – подготовка к практическим занятиям (в т.ч. подготовка к практико-ориентированным заданиям и др.).

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине *«Средства коммуникации в учебной и профессиональной деятельности»* обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к сдаче *зачета*.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине *«Средства коммуникации в учебной и профессиональной деятельности»* являются:

- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);

- подготовка к практическим (семинарским) занятиям (в т.ч. подготовка к выполнению практико-ориентированных заданий, подготовка реферата);
- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Сущность коммуникации в разных социальных сферах. Основные функции и виды коммуникации

Коммуникации
Межличностное общение
Речевые способности
Профессиональное общение

Тема 2. Специфика вербальной и невербальной коммуникации

Вербальная коммуникация
Невербальная коммуникация

Тема 3. Эффективное общение

Эффективное общение
Обратная связь
Стиль слушания

Тема 4. Основные коммуникативные барьеры и пути их преодоления в межличностном общении. Стили поведения в конфликтной ситуации

Конфликт
Барьер речи

Тема 5. Виды и формы взаимодействия студентов в условиях образовательной организации

Группа
Коллектив
Групповое давление
Феномен группомыслия
Феномен подчинения авторитету
Обособление
Диктат
Подчинение
Вызов
Выгода
Соперничество
Сотрудничество
Взаимодействие
Взаимопонимание

Тема 6. Формы, методы, технологии самопрезентации

Самопрезентация
Публичное выступление

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебными и научными изданиями профессиональной и общекультурной тематики – это важнейшее условие формирования научного способа познания.

Основные приемы работы с литературой можно свести к следующим:

- составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;
- перечень должен быть систематизированным;
- обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и выпускных квалификационных работ это позволит экономить время);
- определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;
- при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;
- все прочитанные монографии, учебники и научные статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»: можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);
- если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;
- следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать). Таким образом, чтение текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьезный, кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением, содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студентам с этой целью рекомендуется заводить специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);
- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить, как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);
- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);
- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;
- просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;
- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц; цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;
- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;
- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе –

поиск тех суждений, фактов, по которым, или, в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной и научной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках образовательной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис - это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта - основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть

логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование –наиболее сложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ

Практико-ориентированные задания выступают средством формирования у студентов системы интегрированных умений и навыков, необходимых для освоения профессиональных компетенций. Это могут быть ситуации, требующие применения умений и навыков, специфичных для соответствующего профиля обучения (знания содержания предмета), ситуации, требующие организации деятельности, выбора её оптимальной структуры личностно-ориентированных ситуаций (нахождение нестандартного способа решения).

Кроме этого, они выступают средством формирования у студентов умений определять, разрабатывать и применять оптимальные методы решения профессиональных задач. Они строятся на основе ситуаций, возникающих на различных уровнях осуществления практики и формулируются в виде производственных поручений (заданий).

Под практико-ориентированными заданиями понимают задачи из окружающей действительности, связанные с формированием практических навыков, необходимых в повседневной жизни, в том числе с использованием элементов производственных процессов.

Цель практико-ориентированных заданий – приобретение умений и навыков практической деятельности по изучаемой дисциплине.

Задачи практико-ориентированных заданий:

- закрепление, углубление, расширение и детализация знаний студентов при решении конкретных задач;
- развитие познавательных способностей, самостоятельности мышления, творческой активности;
- овладение новыми методами и методиками изучения конкретной учебной дисциплины;
- обучение приемам решения практических задач;
- выработка способности логического осмысления полученных знаний для выполнения заданий;
- обеспечение рационального сочетания коллективной и индивидуальной форм обучения.

Важными отличительными особенностями практико-ориентированных задания от стандартных задач (предметных, межпредметных, прикладных) являются:

- значимость (познавательная, профессиональная, общекультурная, социальная) получаемого результата, что обеспечивает познавательную мотивацию обучающегося;
- условие задания сформулировано как сюжет, ситуация или проблема, для разрешения которой необходимо использовать знания из разных разделов основного предмета, из другого предмета или из жизни, на которые нет явного указания в тексте задания;

- информация и данные в задании могут быть представлены в различной форме (рисунок, таблица, схема, диаграмма, график и т.д.), что потребует распознавания объектов;

- указание (явное или неявное) области применения результата, полученного при решении задания.

Кроме выделенных четырех характеристик, практико-ориентированные задания имеют следующие:

1. по структуре эти задания – нестандартные, т.е. в структуре задания не все его компоненты полностью определены;

2. наличие избыточных, недостающих или противоречивых данных в условии задания, что приводит к объемной формулировке условия;

3. наличие нескольких способов решения (различная степень рациональности), причем данные способы могут быть неизвестны учащимся, и их потребуется сконструировать.

При выполнении практико-ориентированных заданий следует руководствоваться следующими общими рекомендациями:

- для выполнения практико-ориентированного задания необходимо внимательно прочитать задание, повторить лекционный материал по соответствующей теме, изучить рекомендуемую литературу, в т.ч. дополнительную;

- выполнение практико-ориентированного задания включает постановку задачи, выбор способа решения задания, разработку алгоритма практических действий, программы, рекомендаций, сценария и т. п.;

- если практико-ориентированное задание выдается по вариантам, то получить номер варианта исходных данных у преподавателя; если нет вариантов, то нужно подобрать исходные данные самостоятельно, используя различные источники информации;

- для выполнения практико-ориентированного задания может использоваться метод малых групп. Работа в малых группах предполагает решение определенных образовательных задач в рамках небольших групп с последующим обсуждением полученных результатов. Этот метод развивает навыки сотрудничества, достижения компромиссного решения, аналитические способности.

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Организуйте коллективную сетевую деятельность.

Методические указания:

Под организацией **коллективной сетевой деятельности** понимают совместные действия нескольких пользователей в сети электронных коммуникаций, направленные на получение информации. Участники совместной сетевой деятельности могут быть объединены общими целями, интересами, что позволяет им обмениваться мнениями, суждениями, а также совершать действия с различными объектами, такими как фотографии, программы, записи, статьи, представленными в цифровом виде.

Подобное взаимодействие может заключаться в различных его видах, таких как:

- - общение;
- - обмен данными;
- - организация трудовой деятельности;
- - совместное времяпрепровождение за сетевыми развлечениями.

Рассмотрим каждый из них. Одним из примеров организации **общения** в сети Интернет могут служить популярные на сегодняшний день сообщества **Livejournal** (www.livejournal.ru), **Facebook** (www.facebook.com), **Twitter** (<http://twitter.com>) и др.

По своей сути это социальные сети, которые работают в режиме реального времени, позволяя участникам взаимодействовать друг с другом. Так, социальная сеть Livejournal (Живой журнал) предоставляет возможность публиковать свои и комментировать чужие записи, вести коллективные блоги («сообщества»), получать оперативную информацию, хранить фотографии и видеоролики, добавлять в друзья других пользователей и следить за их записями в «ленте друзей» и др.

Facebook позволяет создать профиль с фотографией и информацией о себе, приглашать друзей, обмениваться с ними сообщениями, изменять свой статус, оставлять сообщения на своей и чужой «стенах», загружать фотографии и видеозаписи, создавать группы (сообщества по интересам).

Система Twitter позволяет пользователям отправлять короткие текстовые заметки, используя web-интерфейс, sms-сообщения, средства мгновенного обмена сообщениями (например, Windows Live Messenger), сторонние программы-клиенты. Отличительной особенностью Твиттера является публичная доступность размещенных сообщений, что роднит его с **блогами** (онлайн-дневник, содержимое которого, представляет собой регулярно обновляемые записи — **посты**).

Другим способом общения, безусловно, является **электронная почта**. Принципы создания ящика электронной почты подробно рассматривались в практикуме параграфа 2.12. При всех своих плюсах электронная почта не позволяет организовать двусторонний оперативный диалог, максимально приближенный к обычному разговору. Отправив письмо, человек уверен, что оно оперативно будет доставлено в ящик адресата, но будет ли получен быстрый ответ? Кроме того, переписка может растянуться, что сводит к минимуму решение возможных актуальных проблем человека в настоящий момент времени.

Именно поэтому возникла необходимость в самостоятельном классе программ, которые выполняли бы две основные задачи:

1. Показать, находится ли собеседник в данный момент в сети Интернет, готов ли он общаться.
2. Отправить собеседнику короткое сообщение и тут же получить от него ответ.

Такие программы получили название IMS (англ. Instant Messengers Service — служба мгновенных сообщений). Часто такие программы называют **интернет-пейджерами**. В качестве примера подобных программ можно привести Windows Live Messenger, Yahoo!Messenger, ICQ.

Так, программа Windows Live Messenger является одним из компонентов Windows Live — набора сетевых служб от компании Microsoft. Ранее мы познакомились с такими его модулями, как Семейная безопасность и Киностудия. Доступ к Messenger можно получить по адресу <http://download.ru.msn.com/wl/messenger>, либо через кнопку **Пуск** на своем персональном компьютере (предварительно установив основные компоненты службы Windows Live).

В настоящее время произошла интеграция Messenger и программы Skype, функции которой будут рассмотрены позже.

Чтобы начать «разговор», достаточно выполнить двойной щелчок мыши на имени собеседника и ввести сообщение в соответствующее окно. Если друга нет на месте, можно оставить ему сообщение, и он увидит его, когда снова войдет в программу.

Коммуникацию в реальном масштабе времени возможно осуществить с помощью **чатов** (англ. Chatter — болтать). Если ваш компьютер оснащен видеокамерой, вы сможете начать видеочат. Одной из наиболее интересных особенностей видео-чата в Messenger является то, что он позволяет делать через Интернет все, что ранее можно было делать только при личном общении. Например, можно легко обмениваться фотографиями и видеть, как собеседник реагирует на них.

Теперь рассмотрим, каким образом можно организовать коллективную сетевую деятельность, связанную с **обменом данными**. Сразу отметим, что для передачи или открытия доступа к файлам в локальной сети используются стандартные возможности операционной системы компьютера. Для этого достаточно в настройках определенной директории открыть общий доступ на чтение или запись другими пользователями сети.

В настоящее время популярнейшим способом обмена данными является размещение файлов на различных видеохостингах и в социальных сетях. **Хостинг** — это услуга по предоставлению вычислительных мощностей для размещения информации на сервере, постоянно находящемся в сети Интернет. Для размещения видеофайлов, как правило, используются такие крупные видеохостинги, как YouTube (www.youtube.com), Rutube (<http://mtube.ru>). Социальные сети, например Одноклассники (www.odnoklassniki.ru), ВКонтакте (<http://vk.com>) и др., также можно использовать для размещения видеоматериалов.

Хранение, обмен файлов возможно организовать и с помощью облачных сервисов, таких как Яндекс.Диск, SkyDrive, iCloud и т.д. Перечислим ряд достоинств подобного способа организации работы:

- не требуется денежных вложений - сервисы бесплатны;
- возможность резервного хранения данных;
- доступность информации из любой точки мира с разных устройств, подключенных к Интернету;
- пользователь самостоятельно определяет доступность к файлам другим людям;
- большой размер облачного хранилища (7-10 Гб);
- информация не привязана к одному компьютеру;
- доступ к файлам, хранящимся на устройствах с разными аппаратными платформами (Windows, Android, iOS).

В качестве примера рассмотрим работу с программой Яндекс.Диск, которую предварительно следует установить на свой компьютер с адреса <http://disk.yandex.ru/download>. После инсталляции программы на вашем устройстве создается папка Яндекс.Диск, в которой будет находиться ряд папок, таких как Документы, Музыка, Корзина. Теперь, после того как мы добавим, изменим или удалим файл в папке Яндекс.Диск на своем компьютере, то же самое автоматически произойдет на серверах Яндекс, т. е. происходит процесс синхронизации.

Поделиться файлом с друзьями через web-интерфейс можно, выполнив следующие действия:

1. Зайти в свой почтовый ящик на сервисе Яндекс.

2. Выполнив команду **Файлы/Документы**, выделить нужный файл из списка.

3. Установить переключатель на панели предпросмотра в положение **Публичный** и нажать на одну из кнопок, расположенных ниже, что гарантирует публикацию ссылки на файл в одной из социальных сетей (ВКонтакте, Facebook и т.д.) либо отправку по электронной почте (рис. 1).



Рис. 1. Ссылка на файл

Другой возможностью публикации ссылки на файл - получение ее через ОС Windows. В этом случае порядок действий следующий:

- 1. Открыть папку Яндекс.Диск.
- 2. Выполнить щелчок правой кнопкой мыши на нужном файле.
- 3. В контекстном меню выбрать пункт **Яндекс.Диск: Скопировать публичную ссылку**.

Теперь в буфере обмена находится ссылка на файл, например, <http://yadi.Sk/d/91nV8FjiOYnX>, с которой вы можете поделиться со своими друзьями.

Перейдем к описанию организации **трудовой деятельности** как способа совместного сетевого взаимодействия. Она может выглядеть самой разной, от простого общения в видеоконференциях, заканчивая использованием серьезных корпоративных решений для управления рабочим процессом в компании. Примерами таких решений являются:

1. 1С-Битрикс: Корпоративный Портал (<http://www.lc-bitrix.ru/products/intranet/>) — система управления внутренним информационным ресурсом компании для коллективной работы над задачами, проектами и документами.
2. Мегатлан (www.megaplan.ru) — онлайн-сервис для управления бизнесом.
3. TeamLab (www.teamlab.com/ru) — многофункциональный онлайн-сервис для совместной работы, управления документами и проектами.
4. BaseCamp (<http://basecamp.com>) — онлайн-инструмент для управления проектами, совместной работы и постановки задач по проектам.

Рассмотрим эти решения на примере облачного сервиса **Мегатлан**, который относится к модели **SaaS** (англ. Software as a service — программное обеспечение как услуга). В рамках модели SaaS заказчики платят не за владение программным обеспечением как таковым, а за его аренду (т. е. за его использование через web-интерфейс). Таким образом, в отличие от классической схемы лицензирования программного обеспечения заказчик несет сравнительно небольшие периодические затраты (от 150 до 400 руб./мес.), и ему не требуется инвестировать значительные средства в приобретение ПО и аппаратной платформы для его развертывания, а затем поддерживать его работоспособность.

Используя на предприятии Мегатлан, можно получить множество современных эффективных средств управления персоналом компании, в частности:

- выстроить иерархическую структуру предприятия, прояснить уровни подчинения, сделать связи сотрудников внутри предприятия логичными и понятными каждому;
- система управления персоналом на предприятии позволит каждому руководителю контролировать деятельность своих подчиненных в режиме реального времени. Кроме того,

можно получать актуальную информацию, даже не находясь в офисе — для этого достаточно иметь доступ в Интернет;

- получить возможность обмениваться документами, выкладывать в общий доступ бизнес-планы, презентации, проекты и распоряжения, ускоряя обмен информацией внутри предприятия;

- системы обмена сообщениями и корпоративный форум делают общение, как деловое, так и личное, более живым и эффективным. Кроме того, выходящая по ходу исполнения задачи, зафиксированные в Мегатлане, позволяют анализировать ход работы над проектом.

Зарегистрировавшись на вышеуказанном сайте, вы получите бесплатный доступ для знакомства с сервисом Мегатлан. Из трех решений предлагаемых компанией, а именно Совместная работа, Учет клиентов и Бизнес-менеджер, выберите первое — **Совместная работа**. Такой выбор дает возможность эффективно управлять проектами, задачами и людьми. Выбрав модуль **Сотрудники**, добавьте несколько сотрудников, заполнив их личные карточки. Много информации в карточки заносить необязательно, их всегда можно отредактировать, при этом не забывая нажимать на кнопку **Сохранить**. Заполненный модуль **Сотрудники** представлен на рис. 2.



Рис. 2. Модуль Сотрудники

Заполнив базу сотрудников, отметив все необходимые сведения в картотеке, вы получаете автоматизированную систему управления персоналом компании, которая более оперативно, чем любой менеджер по кадрам, будет оповещать вас обо всех изменениях, напоминать о днях рождения, давать доступ к картотеке и персональным сообщениям.

Теперь создайте отделы своей виртуальной организации. Для этого, находясь в модуле **Сотрудники**, выберите блок **Структура**, а в нем ссылку **Добавить отдел**. Чтобы добавить сотрудника в отдел, его надо перетащить мышью из списка **Нераспределенные**. После этого следует установить связь «Начальник-Подчиненный», используя ссылки **Начальники**, **Подчиненные**. Подобная ситуация представлена на рис. 3.

Красные стрелки на схеме обозначают вашу подчиненность, а зеленые — сотрудники подчиняются вам.

Для того чтобы организовать взаимодействие в команде, выберите модуль **Задачи** и поставьте перед каждым сотрудником задачу, указав сроки ее выполнения. Сотрудник может принять или отклонить задачу, делегировать ее своему подчиненному, комментировать задачу, оперировать списком своих задач (распечатывать, сортировать по признакам). Он может даже провалить задачу — и это немедленно станет известно всем, кто с ней связан.

Используя модуль **Документы**, попробуйте создать несколько текстовых документов (их объем не может превышать 300 Мб). Также имеется возможность импортировать имеющиеся документы, которые Мегатлан будет сортировать по типам: текстовые

документы, презентации, PDF-файлы, таблицы, изображения и др. Таким образом, можно хранить общие для всей компании договоры, банки, анкеты и другие важные файлы.

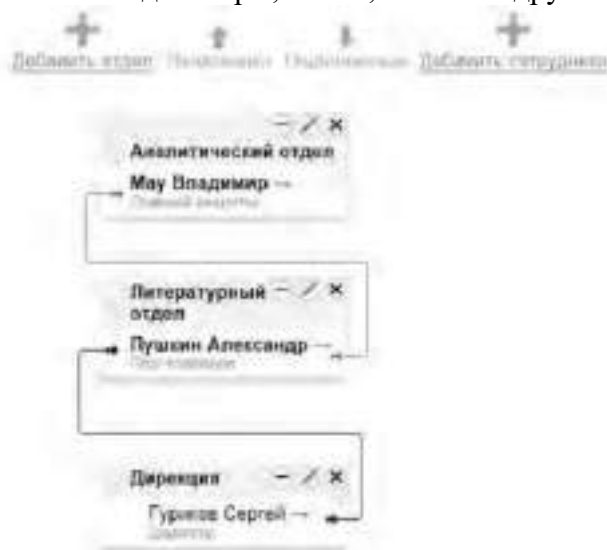


Рис. 3 Организационная структура предприятия

Модуль **Обсуждение** представляет собой корпоративный форум, в рамках которого можно рассматривать любые вопросы. Обсуждение тем может происходить в нескольких уже созданных разделах, а именно Новости, Отдых, Работа. Подобная ситуация представлена на рис. 4.

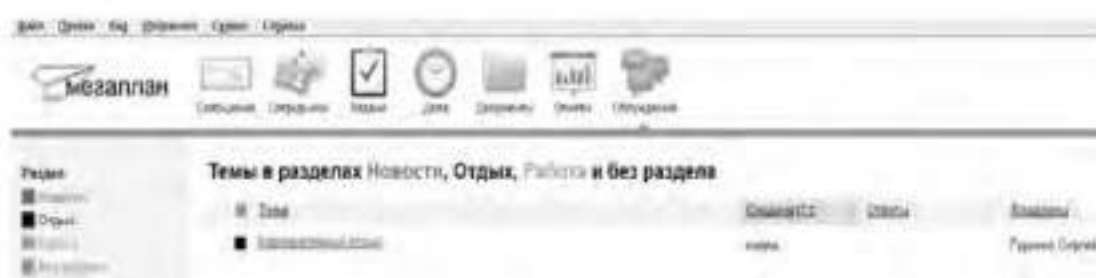


Рис. 4.Создание темы в модуле Обсуждение

Создайте несколько тем, воспользовавшись кнопкой **Добавить**. Обратите внимание на то, что вы можете ограничить просмотр обсуждаемых тем отдельным сотрудникам и группам. Корпоративный форум делает общение внутри компании более открытым. Возможность общения онлайн между сотрудниками, встреча которых могла бы и не произойти в реальной жизни, развивает неформальные отношения, вследствие которых совместная работа над проектами становится более комфортной. Работа над проектом, созданным в виртуальной среде, существенно упрощается за счет системы обмена сообщениями (модуль **Сообщения**), совместной работы, обработки файлов, находящихся в общем доступе.

Итак, освоение базовых функциональных операций в процессе работы с Мегапланом происходит очень быстро. С учетом того, что бесплатная версия продукта позволяет зарегистрировать трех пользователей, можно организовать сетевое взаимодействие, создав учебное предприятие и тем самым, усовершенствовать навыки взаимодействия исполнителей и руководителей в рабочем процессе.

Совместное времяпрепровождение за сетевыми развлечениями — последний вид сетевого взаимодействия, рассматриваемого нами. Сетевыми развлечениями в основном являются компьютерные игры. Вид взаимодействия в играх может быть различным: игроки могут соперничать друг с другом, могут быть в команде, а в некоторых играх возможны оба

вида взаимодействия. Соперничество может выражаться как напрямую, например игра в шахматы, так и в таблице рейтингов в какой-нибудь браузерной игре.

Существует особый жанр игр MMORPG (англ. Massive Multiplayer Online Role-playing Game, массовая многопользовательская онлайн ролевая игра) — разновидность онлайн ролевых игр, позволяющая тысячам людей одновременно играть в изменяющемся виртуальном мире через Интернет. Сообщество любителей игр в жанре MMORPG зарегистрировано в сети Интернет по адресу www.mmorpg.su.

Подобные игры, как правило, построены на технологии «клиент-сервер», но есть разновидности, где в качестве клиента выступает обычный браузер. Игрок в такой игре представляется своим **аватаром** — виртуальным представлением его игрового персонажа. Создатели игры поддерживают существование игрового мира, в котором происходит действие игры и который населен ее персонажами.

Когда геймеры попадают в игровой мир, они могут в нем выполнять различные действия вместе с другими игроками со всего мира. Разработчики MMORPG поддерживают и постоянно развивают свои миры, добавляя новые возможности и доступные действия для того, чтобы «гарантировать» интерес игроков. Яркими представителями подобного рода игр на сегодняшний день являются EverQuest, World of Warcraft, Anarchy Online, Asheron's Call, Everquest II, Guild Wars, Ragnarok Online, Silkroad Online, The Matrix Online, City of Heroes.

Задания:

а)Создайте свой аккаунт (если вы его не имеете) в одной из социальных сетей, например Livejournal или Facebook. Выполните скриншоты своего блога. Результат отправьте на электронную почту преподавателя.

б)Используя программу Windows Live Messenger, добавьте в друзья (по предварительной договоренности) своего преподавателя и свяжитесь с ним в режиме реального времени либо оставьте ему сообщение.

в)Установите на свой компьютер программу Яндекс.Диск. Предоставьте доступ к нескольким файлам своему преподавателю.

г)Создайте учебное предприятие, используя облачный сервис Мегатлан. Заполните информацией все имеющиеся в программе модули. Установите связи между отделами. Пригласите нескольких своих друзей в проект. Продемонстрируйте результат преподавателю, открыв ему доступ.

д)Напишите краткий отчет о результатах своей работы по созданию виртуального предприятия, указав в нем этапы его создания, результаты совместной сетевой деятельности.

е)Являетесь ли вы участником какой-либо игры в жанре MMORPG? Если да, расскажите об основных правилах той игры, в которой вы участвуете. Каким образом происходит ваше взаимодействие в ней с друзьями?

3. Организация форумов

Методические указания

В настоящее время перед каждым образовательным учреждением стоит задача формирования открытой информационной образовательной среды. Эффективным механизмом является использование коммуникационных возможностей сети Интернет. В частности, организация на сайтах или в информационных системах образовательных учреждений форумов (дискуссий).

Форум — это web-страница, созданная на основе клиент-серверной технологии для организации общения пользователей сети Интернет. Концепция форума основана на создании разделов, внутри которых происходит обсуждение различных тем в форме сообщений. От чата форум отличается тем, что общение может происходить не в реальном времени. Таким образом, человек имеет возможность подумать над своим ответом или над создаваемой темой.

По методу формирования набора тем форумы бывают:

- **тематические.** В рамках таких форумов пользователи обсуждают предварительно опубликованную статью, новость СМИ и т.д. Обсуждение происходит в одной или нескольких темах;

- **проблемные.** Для обсуждения предлагается ряд проблемных вопросов (тем). Обсуждение каждой проблемы происходит в своей ветке. Чаще всего в подобных типах форумов пользователь не имеет права создавать новую тему;

- **постоянно действующие форумы.** Форумы поддержки (помощи). По такому принципу строятся форумы технической поддержки, различные консультации и пр. Чаще всего это форумы с динамическим списком тем, где простые участники могут создавать новую тему в рамках тематики форума.

Форумы функционируют согласно определенным правилам, которые определяют администраторы и модераторы. **Администратор форума** следит за порядком во всех разделах, контролирует общение на ресурсе и соблюдение правил сайта. **Модератор форума** чаще всего следит за порядком в конкретном разделе, имеет более узкие права, чем администратор. Его основная задача — увеличивать популярность форума, количество участников и число интересных обсуждений. Дополнительные задачи:

- стимулировать появление новых интересных тем;
- стимулировать общение на форуме;
- не допускать конфликтных ситуаций на форуме, а в случае их возникновения — уметь найти выход из сложной ситуации;
- при появлении в темах **спам** (рассылка коммерческой и иной рекламы или иных видов сообщений (информации) лицам, не выразившим желания их получать) немедленно сообщать об этом администратору сайта;
- следить за культурой сетевого общения.

Для каждого конкретного форума администратором могут быть созданы свои правила, но в целом их можно свести к следующим:

1. На форумах приветствуется поддержание дискуссии, обмен опытом, предоставление интересной информации, полезных ссылок.

2. Не нужно вести разговор на «вольные» темы и размещать бессодержательные (малосодержательные) или повторяющиеся сообщения. Под бессодержательными (малосодержательными) понимаются, в частности, сообщения, содержащие исключительно или преимущественно эмоции (одобрение, возмущение и т. д.).

3. Желательно проверять грамотность сообщений (например, редактором Microsoft Word) — ошибки затрудняют понимание вопроса или ответа и могут раздражать участников обсуждения.

4. Длинные сообщения желательно разбивать на абзацы пустыми строчками, чтобы их было удобно читать.

5. Запрещается размещать заведомо ложную информацию.

6. Не рекомендуется публиковать сообщения, не соответствующие обсуждаемой теме, в том числе личные разговоры в ветках форума.

7. Не следует писать сообщения сплошными заглавными буквами, так как это эквивалентно повышению тона, а также латинскими буквами. При этом сообщение считается нарушающим данное правило, если такого рода текстом набрано более трети всего сообщения.

8. Участники форума не должны нарушать общепринятые нормы и правила поведения. Исключено употребление грубых слов и ненормативной лексики, выражение расистских, непристойных, оскорбительных или угрожающих высказываний, нарушений законодательства в области авторского права или сохранности конфиденциальной информации.

9. Запрещено публично обсуждать нелегальное использование (в том числе взлом) программного обеспечения, систем безопасности, а также публикацию паролей, серийных номеров и адреса (ссылки), по которым можно найти что-либо из вышеназванного.

10. Не следует размещать в форумах, а также рассылать через личные сообщения коммерческую рекламу и спам.

Для создания форумов используется ряд программных решений, написанных на языке PHP (англ. Hypertext Preprocessor — предпроцессор гипертекста) и используемых для ведения своей базы данных сервер MySQL. К их числу относятся **Invision Power Board** (www.invisionpower.com), **vBulletin** (www.vbulletin.com), **PHP Bulletin Board** (www.phpbb.com), **Simple Machines Forum** (www.simplemachines.org) и ряд других. Однако создать «движок форума» с помощью перечисленного программного обеспечения начинающему пользователю будет весьма непросто, поскольку и сами программы, и документация к ним написаны на английском языке.

Попробовать свои силы для создания тематического форума можно с использованием российских web-сервисов, предлагающих свои услуги в этом направлении. Остановим свой выбор на сервисе Forum2x2 (www.forum2x2.ru), который предлагает создание и хостинг форумов. Forum2x2 позволяет создать форум бесплатно, всего за несколько секунд и без всяких технических знаний, а после — мгновенно начать общение. Интерфейс форума является наглядным, простым в использовании и легко настраивается.

Определим следующую задачу — создать форум своего учебного заведения. Находясь на сайте сервиса Forum2x2, выберем кнопку **Создать бесплатный форум**. Пользователю будет предложено выбрать одну из четырех версий создания форумов: Phpbb3, Phpbb2, IPB и Punbb. Их краткая характеристика будет представлена в соответствующих вкладках. Воспользуемся самым простым из них - **Punbb**, который предоставляет только базовые опции web-форума, а следовательно, является оптимальным по скорости и простоте использования. Далее нам предстоит выполнить три простых шага:

1. Выбрать графический стиль форума.
2. Ввести название форума, его интернет-адрес, свой адрес электронной почты, пароль.
3. Прочитать информацию о недопустимом содержании создаваемого форума.

На этом создание форума можно считать завершенным. На рис. 5 представлен один из возможных примеров созданного форума.



Рис. 5 Внешний вид созданного форума

В своем электронном почтовом ящике вы обнаружите письмо от администрации сервиса Forum2x2, в котором будут даны несколько полезных советов для успешного начала работы форума, в частности:

- - поместить в форум несколько сообщений, чтобы задать тон обсуждения;
- - внести личный аспект в стиль оформления форума, подобрав цвета и шрифты;

- - сообщить по электронной почте друзьям о новом форуме и пригласить их поучаствовать в форуме;
- - поместить ссылки на форум на других сайтах, форумах и в поисковых системах.

Для администрирования вновь созданного форума необходимо ввести имя пользователя (Admin) и пароль, который вы выбрали при создании форума. После этого вы получаете доступ к ссылке **Панель администратора**, расположенной внизу страницы, которая имеет несколько вкладок (рис. 6).



Рис. 6. Вкладки Панели администратора

Вкладка **Главная** отображает информацию по статистике созданных сообщений, количеству пользователей и тем. Здесь же можно воспользоваться практическими советами по повышению посещаемости созданного форума. Попробуйте пригласить на созданный форум своих друзей, знакомых, с помощью ссылки **Адреса Email**, вводя в соответствующее поле их электронные адреса. Максимальное число приглашений, отправляемых за один раз, — десять.

Вкладка **Общие настройки** позволяет сконфигурировать форум в соответствии с личными целями администратора. В частности, можно изменить название сайта, его описание, определить конфигурацию защиты форума, определить E-mail администратора.

С помощью раздела **Категории и форумы** создайте свои форумы, определите порядок их вывода с помощью соответствующих кнопок (**Сдвинуть вверх**, **Сдвинуть вниз**). **Категория** представляет собой совокупность форумов, объединенных общей тематикой. Один из возможных примеров создания форумов приведен на рис. 7.

Сделанные изменения доступны для просмотра после нажатия на кнопку **Просмотр форума**. Находясь на вкладке **Общие настройки**, перейдите в раздел **Раскрутка форума** и выберите пункт **Поисковые системы**. Введите информацию для ваших мета-тегов, чтобы улучшить позицию вашего форума в поисковых системах. **Мета-теги** — это невидимые коды, используемые поисковиками для индексации и позиционирования вашего форума. Зарегистрируйте ваш форум в основных поисковых системах: Yandex, Google, Rambler.



Рис. 7. Структура форумов

Используя вкладку **Оформление**, поэкспериментируйте с различными стилями для того, чтобы повысить привлекательность форума. Здесь же можно поменять версию «движка» форума.

Будучи администратором вашего форума, вы являетесь его единственным полноправным хозяином и полностью контролируете его. С помощью вкладки **Пользователи & Группы** создайте группу модераторов, ответственных за соблюдение установленных вами правил (правил орфографии, правил поведения на форуме и т.д.).

Перейдите на вкладку **Модули**. Здесь вы можете добавить к вашему форуму такие модули, как портал, календарь, галерея, чат или листы персонажей. Выберите ссылку **Портал**. Появится информация о том, что портал не установлен. Нажмите ссылку — установить. Внешний вид созданного портала представлен на рис. 8.



Рис. 8. Созданный портал

На вкладке **Модули** попробуйте поработать с виджетами (гаджетами) форума, из которых и состоит портал. **Виджет** — это элемент интерфейса, предназначенный для облегчения доступа к информации.

Добавьте/удалите стандартные виджеты форума (Поиск, Календарь, Новости, Последние темы, Самые активные пользователи и др.), отслеживая изменения нажатием кнопки **Просмотр портала**. Оставьте наиболее удачный, с вашей точки зрения, вариант.

Итак, мы приобрели первоначальные практические навыки создания собственного форума и выполнили действия, направленные на увеличение его посещаемости. Кроме того, необходимо создать ссылку на форум с главной страницы сайта учебного заведения. Следует отметить, что, для того чтобы созданный форум не оставался в статичном виде, необходима большая работа администратора, модераторов по его поддержанию.

Альтернативным способом организации форумов является их развертывание в информационной системе учебного заведения. На современном отечественном рынке автоматизированных информационных систем управления учебным процессом представлено достаточно большое количество решений. Свой выбор остановим на ИС ModEUS (<http://modeus.krf.ane.ru/index.php>), которая разработана с учетом специфики российского образования и обеспечивает автоматизацию учебного процесса, в том числе и дистантного (учет учебного процесса, его планирование и публикация, подготовка отчетной документации).

После регистрации в системе ModEUS, нужно выбрать ссылку **Дискуссии**. Вы можете организовать дискуссию (форум) по любому из находящихся в системе курсов, щелкнув мышью по его названию.



Рис. 9. Страница Дискуссии в ИС ModEUS

Создадим новую тему, нажав одноименную кнопку. Впишем в соответствующие поля название темы и вопрос, предлагаемый для обсуждения. Подобная ситуация представлена на рис. 437. Кроме того, мы имеем возможность прикрепить текстовый файл объемом не более 16 Мб, например список вопросов к экзамену.

После нажатия на кнопку **Создать** тема дискуссии отображается в системе (рис. 10), и любой из студентов может принять участие в ее обсуждении.

Таким образом, можно определить преимущества создания форума в информационной системе учебного заведения:

- - отсутствует необходимость иметь практические навыки работы по созданию web-страниц;
- - нет необходимости заботиться о раскрутке форума - студенты и преподаватели постоянно работают в системе.

В то же время есть и ряд недостатков, в частности:

- - форум доступен исключительно для студентов и преподавателей учебного заведения, в котором функционирует информационная система;
- - стандартизированный типовый интерфейс для всех выполняемых функций;
- - нет возможности организовать дискуссию на вольную тему.



Рис. 10 Создание новой темы

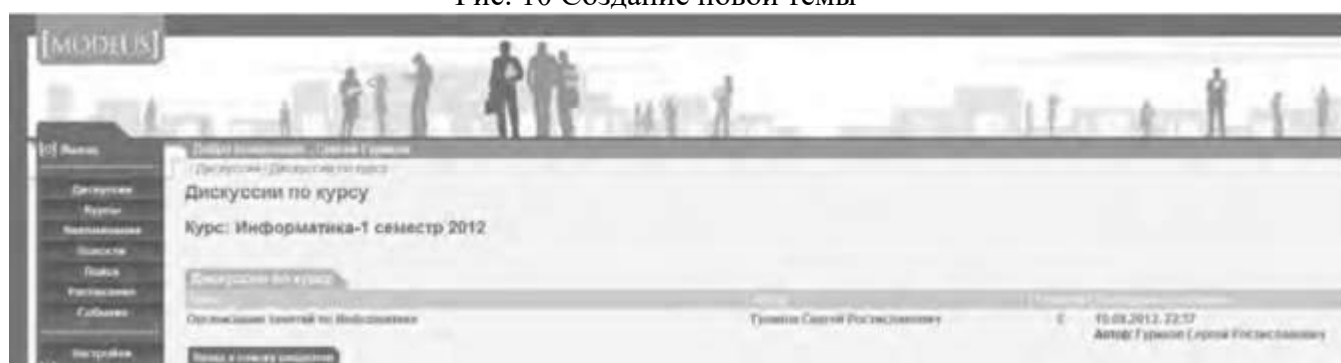


Рис. 11. Создана тема для дискуссии

Использование тестирующих систем в локальной сети образовательного учреждения

Теперь познакомимся с возможностями ИС ModEUS для **организации тестирования студентов в локальной сети образовательного учреждения**. Использование тестирования как наиболее объективного метода оценки качества образования широко используется в учебных заведениях России. Полнота охвата проверкой требований к уровню подготовки студентов предполагает методику конструирования тестовых заданий закрытого и открытого типа. К тестовым заданиям **закрытого типа** относятся задания, предполагающие выбор верного ответа из предложенных вопросов. Тестовые задания **открытого типа** требуют конструирования ответов с кратким и развернутым ответом. И тот, и другой тип заданий успешно реализуются в ИС ModEUS.

Прежде чем создать тестовое задание, необходимо зайти в один из учебных курсов, находящихся в репозитории (хранилище данных), нажав кнопку **Курсы** в главном меню. Под «курсом» в PC ModEUS понимается дисциплина, находящаяся в учебном плане.

Найдем в списке **Занятия курса** требуемое занятие и нажмем ссылку **Список заданий**, находящуюся справа от поля **Тип**. Для того чтобы добавить задание в занятие, нажмем кнопку **Добавить**. Подобная ситуация представлена на рис. 11.

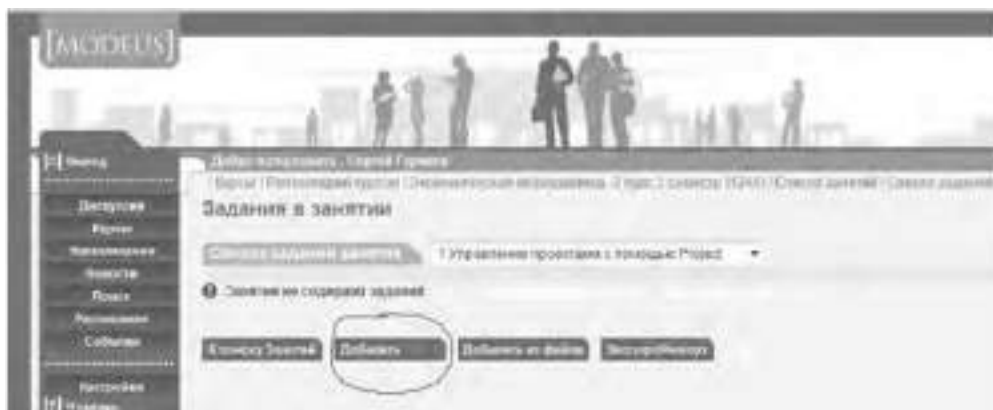


Рис.12. Добавление задания

Тип задания можно выбрать из раскрывающегося списка (рис. 12), кроме того, можно дать название новому заданию, установить балл и выбрать количество попыток сдачи.

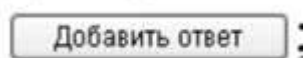


Рис.13. Выбор типа задания

Рассмотрим несколько примеров формирования вопросов закрытого и открытого типа в IC ModEUS.

Тестовое задание со множественным выбором верных ответов (закрытый тип). Данный тип задания дает вам возможность задать вопрос и варианты ответов на него, из которых обучающийся должен выбрать верный (рис. 14). Правильным может быть один или несколько вариантов. Для того чтобы наполнить задание, выполните следующие действия:

- - в опции **Перемешивать варианты ответов** поставьте метку в поле **Перемешивать**, если вы хотите, чтобы указанные вами варианты ответов выводились на экран в различном порядке, поставьте метку в поле **Не перемешивать**, если варианты ответов должны выводиться всегда в одинаковом порядке;
- - в опции **Тип множественного выбора** поставьте метку в поле **Возможность выбора студентом одного ответа**, если обучающийся из предложенных вариантов ответов может выбрать только один верный, поставьте метку в поле **Возможность выбора студентом нескольких ответов**, если обучающийся может выбрать несколько верных ответов;
- - введите текст задания в поле **Текст задания**;
- - в случае если в задании присутствует приложение, укажите путь к этому приложению, нажав на кнопку **Обзор...** и указав путь к файлу на жестком или сетевом диске. Приложением может быть документ любого формата, например изображение;
- - введите тексты вариантов ответов в соответствующие поля;
- - для добавления нового поля под вариант ответа нажмите на кнопку



- каждый вариант ответа может быть дополнен приложением. Для добавления к варианту ответа приложения укажите путь к нему в поле **Добавить приложение**, нажав на



кнопку и указав путь к файлу на жестком

или сетевом диске;

- установите флажки напротив одного или нескольких правильных вариантов ответа;

- нажмите на кнопку **Зафиксировать** для сохранения задания в базе данных;

- нажмите на кнопку **Сохранить и добавить новое**; чтобы сохранить задание и сразу

перейти к составлению нового задания.

Имя:
Задание 5

Баллы за задание: 1

Попыток: 1

Тип задания: Множественный выбор

Добавление нового задания "Задание 5"

Перемещать варианты ответов:

☒ Перемещать

☐ Не перемещать

Тип множественного выбора:

☒ Возможность выбора студентом одного ответа

☐ Возможность выбора студентом нескольких ответов

Текст задания:

На каком уровне семантической модели ISO происходит передача кадров данных между узлами. В качестве адресов используется MAC-адреса

Добавить приложение: Обзор

Варианты ответов:

1 Физический уровень

Добавить приложение: Обзор

2 канальный уровень

Добавить приложение: Обзор

3 сетевой уровень

Добавить приложение: Обзор

4 транспортный уровень

Добавить приложение: Обзор

5 связный уровень

Добавить приложение: Обзор

6 уровень представления

Добавить приложение: Обзор

7 прикладной уровень

Добавить приложение: Обзор

Добавить ответ

Рис. 14. Создание задания со множественным выбором верных ответов

Тестовое задание с добавлением слова (открытый тип). Данный тип задания (рис. 15) дает вам возможность задать вопрос, на который обучающийся должен ответить, введя ответ с клавиатуры в виде текста, цифры, слова, математической формулы и т.д. Для того чтобы наполнить задание, выполните следующие действия:

- - введите текст задания в поле **Текст задания**;
- - текст задания может представлять собой текст или текст в сочетании с

приложением. Чтобы добавить приложение (изображение или документ), нажмите на кнопку **Обзор...**, находящуюся под полем **Текст задания**, и укажите путь к файлу на жестком или сетевом диске;

- - в поле **Вопрос** введите вопрос, на который должен ответить обучающийся;
- - в поле **Ответ** укажите правильный ответ;
- в пределах одного задания вы можете задать обучающемуся несколько вопросов. Для

добавления вопроса нажмите на кнопку **Добавить вопрос**;

- нажмите на кнопку **Зафиксировать** для сохранения задания в базе данных;

- нажмите на кнопку **Сохранить и добавить новое**, чтобы сохранить задание и сразу перейти к составлению нового задания.

Рис. 15 Создание задания с добавлением слова

Кроме рассмотренных типов заданий, в ИС ModEUS существует и ряд других, в частности: **Верно - неверно**. Данный тип задания предоставляет возможность обучающемуся выбрать один из вариантов ответа («верно» или «неверно») на поставленный вопрос.

Группировка. В данном типе задания обучающемуся необходимо распределить заданный список понятий по группам.

Заполни поле (проверка с диапазоном). Данный тип задания дает возможность задать вопрос, на который обучающийся должен ответить, введя с клавиатуры числовой ответ.

Сопоставление. Проверяется способность обучающихся сопоставить понятия по указанному принципу.

Эссе. Обучающийся отвечает в свободной форме на поставленный преподавателем вопрос. Вопрос может быть представлен в виде текста или любого другого документа.

Следует отметить, что в ИС ModEUS можно задать количество вопросов, время на проведение тестовых заданий, а также **мощность теста**. Мощность определяет количество заданий, которые будут предложены студенту для выполнения. Например, если в группе заданий десять вариантов заданий, а мощность группы равна пяти, то студенту будут предложены для выполнения пять заданий из десяти. После проведения тестирования в

информационной системе происходит автоматическое формирование оценок на основании выполненных студентами заданий.

Итак, мы завершили рассмотрение возможностей информационной системы, работающей в локальной сети учебного заведения для организации форумов и проведения тестирования студентов.

Настройка видео web-сессий

В настоящее время миллионы пользователей во всем мире используют видеосвязь с помощью сети Интернет для общения друг с другом. Достоинства такого способа общения очевидны: есть возможность слышать и визуально наблюдать собеседника, находящегося, возможно, за тысячи километров. Для обеспечения полноценной видеосвязи для захвата и воспроизведения видео и звука могут использоваться как встроенные в компьютер камера, микрофон или динамик, так и внешние устройства, такие как web-камера, головная гарнитура, а также следует обеспечить высокоскоростной доступ к Интернету.

Взаимодействие собеседников при организации видео web-сессий возможно в нескольких направлениях: видеоконференция и видеотелефония.

1. Видеоконференция — это технология интерактивного взаимодействия двух и более человек, при которой между ними происходит обмен информацией в режиме реального времени. Существует нескольких видов видеоконференций:

- **симметричная (групповая)** видеоконференция позволяет проводить сеансы показа презентаций или рабочего стола;
- **асимметричная** видеоконференция используется для дистанционного образования. Позволяет собрать в конференции множество участников таким образом, что все они будут видеть и слышать одного ведущего, он, в свою очередь, всех участников одновременно;
- **селекторное видеосовещание** — рассчитано на взаимодействие большой группы участников, при котором пользователи имеют возможность активно обсуждать действия при чрезвычайных ситуациях, оперативно решать текущие вопросы.

Для эффективной организации проведения web-конференций, маркетинговых презентаций, онлайн-обучения, совещаний и любых других видов онлайн-встреч существует ряд программных решений. В качестве примера можно привести программы Mirapolis Virtual Room (<http://virtualroom.ru/>), ВидеоМост (www.videomost.com), TrueConf Online (<http://trueconf.ru/>) и др.

2. Видеотелефония — реализуется посредством сеанса видеосвязи между двумя пользователями, во время которого они могут видеть и слышать друг друга, обмениваться сообщениями и файлами, вместе работать над документами и при этом находиться в разных местах в комфортной для себя обстановке.

Для того чтобы общаться с близкими и друзьями, можно бесплатно совершать видеозвонки с помощью таких программ, как Skype (<http://www.Skype.com/intl/ru/get-skype>), Mail.ru Агент (<http://agent.mail.ru>) и ряд других.

Для того чтобы проверить наличие встроенной web-камеры на компьютере, достаточно войти в меню **Пуск**, выбрать **Компьютер**, щелкнуть на нем правой кнопкой мыши и в контекстно-зависимом меню нажать пункт **Свойства**. Далее следует выбрать пункт меню **Диспетчер устройств**, а в нем пункт **Устройства обработки изображений**. Наличие в нем устройства, например, USB 2.0 Camera свидетельствует о наличии web-камеры.

Кроме того, в документации к компьютеру (Руководство пользователя) или другому устройству должны быть приведены сведения об установленных в систему устройствах и, в частности, инструкция по использованию встроенной камеры и программному обеспечению, отвечающему за данное устройство.

Одной из таких популярных утилит является ArcSoft WebCam Companion — пакет приложений для взаимодействия с web-камерой, который позволяет захватывать, редактировать изображения и записывать видео. Самостоятельно проведите ее установку,

воспользовавшись web-адресом <http://arcsoft-webcam-companion.en.softonic.com>. После установки данной программы на компьютер ее можно запустить на выполнение командой **Пуск/Все программы/ArcSoft WebCam Companion/WebCam Companion**. Интерфейс программы представлен несколькими разделами: Захват, Маска, Забавная рамка, Правка, Монитор, Другие приложения (рис. 16).



Рис. 16. Пункты меню программы ArcSoft WebCam Companion

Выберем значок **Захват**, а в нем пункт меню **Параметры web-камеры**. Откроется окно, представленное на рис. 17.

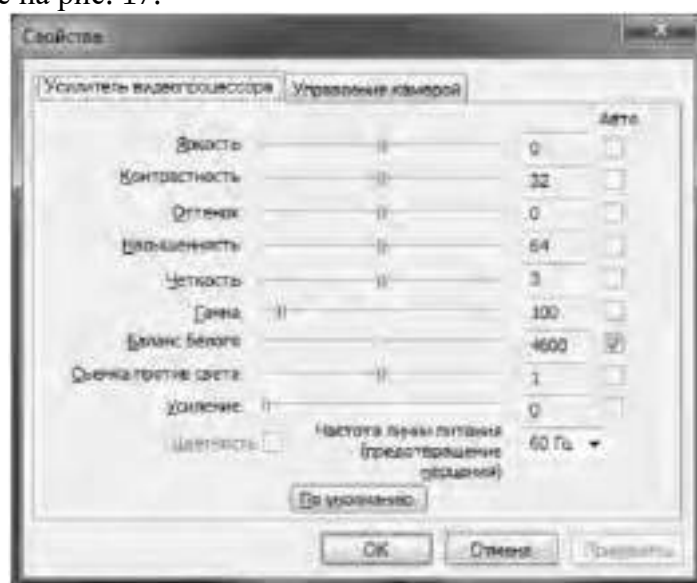


Рис. 17. Окно Свойства web-камеры

Как видно из рис. 17, в данном окне можно изменить основные параметры настройки web-камеры, одновременно наблюдая за результатом на экране. При желании настройки можно вернуть в исходное состояние, нажав на кнопку **По умолчанию**.

Теперь поговорим о том, как организовать web-сессию в такой популярной программе, как Skype. Ее большим преимуществом является такой факт, что звонки между абонентами являются бесплатными. Однако, если вы делаете звонок на мобильный или стационарный телефон, вам потребуется позаботиться о том, чтобы на вашем счете были деньги. Положить деньги на оплату разговоров в Skype вы можете с использованием такого сервиса, как Яндекс.Деньги (<https://money.yandex.ru/>).

Инсталлируйте программу Skype, воспользовавшись ее адресом в сети Интернет <http://www.skype.com/intl/ru/get-skype>. После установки программа становится доступной после выполнения команды **Пуск/Все программы/ Skype/Skype**. В окне регистрации введите свой логин и пароль. Обратите внимание на то, что если вы установите флажок в пункте **Автоматическая авторизация при запуске Skype**, то вам не придется каждый раз вводить свои данные.

Добавьте своих друзей, родственников в список контактов, воспользовавшись командой **Контакты/Добавить контакт**. Вам нужно ввести фамилию, имя знакомого, его контактный телефон, адрес электронной почты. В результате ваши контакты будут располагаться в группе **Контакты** и будут видны при каждом запуске программы.

Выполним настройку web-камеры. Последовательно нажмем **Инструменты/Настройки/Настройки видео**. Появится окно, представленное на рис. 18.

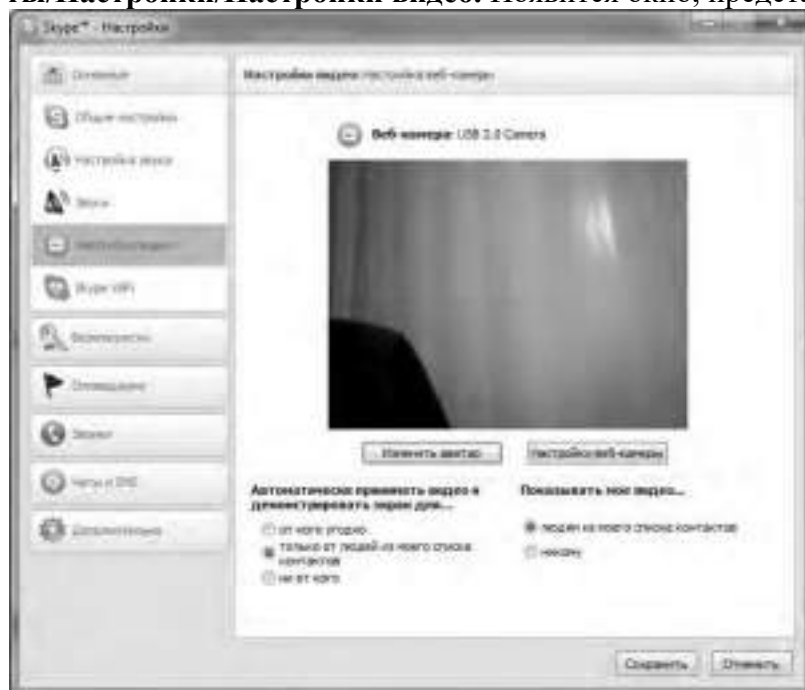


Рис.18. Окно Настройки

Если вы видите изображение - камера настроена и готова к работе. В противном случае, Skype выведет об этом текстовое сообщение. Теперь перейдем в меню **Настройка звука**. Проверьте, что поставлен флажок в опции **Разрешить автоматическую настройку микрофона**. Скажите несколько слов вслух, уровень громкости звука в опции **Громкость** должен изменяться. Окончательно проверить сделанные настройки можно с помощью контрольного звонка. Для этого, находясь в меню **Настройка звука**, выберите пункт **Сделать контрольный звонок в Skype**. В ходе контрольного звонка вы сможете сделать запись своего голоса в течение десяти секунд, а затем прослушать его. Если этот эксперимент окончится удачно, значит, все настройки выполнены правильно и программа готова к работе.

Теперь, когда мы завершили работу с настройками программы, можно попробовать сделать видеозвонок. Для этого необходимо совершить следующие действия:

1. Войти в программу Skype.
2. В группе **Контакты** щелчком мыши выбрать абонента. Во время звонка он должен быть в сети, о чем будет свидетельствовать соответствующий значок в программе Skype.
3. Нажать кнопку **Видеозвонок**.

Через несколько секунд соединение будет установлено и вы можете начать разговор, в процессе которого вы будете видеть и слышать своего собеседника. Подобная ситуация представлена на рис. 19.



Рис. 19 Сеанс связи установлен

Если во время разговоров у вас возникают неполадки со звуком, такие как сильный фоновый шум, эхо, задержка звука, «механический» звук или пропадание слов, следует убедиться в следующем:

1. Использует ли собеседник последнюю версию программы Skype? Информацию о версии программы можно получить, выполнив команду **По- мощь/О Skype**.
2. Нет ли рядом с микрофоном источников шума?
3. Не расположен ли микрофон рядом с динамиками?
4. Достаточно ли высокая скорость соединения?

Кроме того, когда программа Skype обнаруживает неполадки во время звонка, на экране появляется сообщение с рекомендациями, которые помогут вам повысить качество связи. Необходимо выполнить эти рекомендации.

Итак, вы получили теоретические сведения и практические навыки работы с организацией видео web-сессий, которые, несомненно, будут востребованы в вашей повседневной жизни.

Задания:

а) Зарегистрируйтесь на сервисе Forum2x2. Создайте форум своего учебного заведения, выбрав одну из четырех версий создания форумов. Выполните советы для успешного начала работы своего форума, приведенные в параграфе 5.4. После завершения работы отправьте на электронную почту преподавателя ссылку на созданный вами форум.

б) Установите на свой компьютер программу Skype. Сделайте видеозвонок вашему преподавателю (по предварительной договоренности).

2. Проведите диагностику стиля делового общения.

Инструкция. С помощью этого теста вы можете оценить свой стиль делового общения. Вам предложено 80 утверждений. Из каждой пары выберите одно — то, которое, как вы считаете, наиболее соответствует вашему поведению. Обратите внимание на то, что ни одна пара не должна быть пропущена. Тест построен таким образом, что ни одно из приведенных ниже утверждений не является ошибочным.

1. Я люблю действовать.
2. Я работаю над решением проблем систематическим образом.
3. Я считаю, что работа в командах более эффективна, чем на индивидуальной основе.
4. Мне очень нравятся различные нововведения.
5. Я больше интересуюсь будущим, чем прошлым.
6. Я очень люблю работать с людьми.
7. Я люблю принимать участие в хорошо организованных встречах.
8. Для меня очень важными являются окончательные сроки.

9. Я против откладываний и проволочек.
10. Я считаю, что новые идеи должны быть проверены прежде, чем они будут применяться на практике.
11. Я очень люблю взаимодействовать с другими людьми. Это меня стимулирует и вдохновляет.
12. Я всегда стараюсь искать новые возможности.
13. Я сам люблю устанавливать цели, планы и т.п.
14. Если я что-либо начинаю, то доделываю это до конца.
15. Обычно и стараюсь понять эмоциональные реакции других.
16. Я создаю проблемы другим людям.
17. Я надеюсь получить реакцию других на свое поведение.
18. Я нахожу, что действия, основанные на принципе «шаг за шагом», являются очень эффективными.
19. Я думаю, что хорошо могу понимать поведение и мысли других.
20. Я люблю творческое решение проблем.
21. Я все время строю планы на будущее.
22. Я восприимчив к нуждам других.
23. Хорошее планирование — ключ к успеху.
24. Меня раздражает слишком подробный анализ.
25. Я остаюсь невозмутимым, если на меня оказывают давление.
26. Я очень ценю опыт.
27. Я прислушиваюсь к мнению других.
28. Говорят, что я быстро соображаю.
29. Сотрудничество является для меня ключевым словом.
30. Я использую логические методы для анализа альтернатив.
31. Я люблю, когда одновременно у меня идут разные проекты.
32. Я постоянно задаю себе вопросы.
33. Делая что-либо, я тем самым учусь.
34. Полагаю, что я руководствуюсь рассудком, а не эмоциями.
35. Я могу предсказать, как другие будут вести себя в той или иной ситуации.
36. Я не люблю вдаваться в детали.
37. Анализ всегда должен предшествовать действиям.
38. Я способен оценить климат в группе.
39. У меня есть склонность не заканчивать начатые дела.
40. Я воспринимаю себя как решительного человека.
41. Я ищу такие дела, которые бросают мне вызов.
42. Я основываю свои действия на наблюдениях и фактах.
43. Я могу открыто выразить свои чувства.
44. Я люблю формулировать и определять контуры новых проектов.
45. Я очень люблю читать.
46. Я воспринимаю себя как человека, способного интенсифицировать, организовать деятельность других.
47. Я не люблю заниматься одновременно несколькими вопросами.
48. Я люблю достигать поставленных целей.
49. Мне нравится узнавать что-либо о других людях.
50. Я люблю разнообразие.
51. Факты говорят сами за себя.
52. Я использую свое воображение, насколько это возможно.
53. Меня раздражает длительная, кропотливая работа.
54. Мой мозг никогда не перестает работать.
55. Важному решению предшествует подготовительная работа.
56. Я глубоко уверен в том, что люди нуждаются друг в друге, чтобы завершить работу.

57. Я обычно принимаю решение, особо не задумываясь.
58. Эмоции только создают проблемы.
59. Я люблю быть таким же, как другие.
60. Я не могу быстро прибавить пятнадцать к семнадцати.
61. Я примеряю свои новые идеи к людям.
62. Я верю в научный подход.
63. Я люблю, когда дело сделано.
64. Хорошие отношения необходимы.
65. Я импульсивен.
66. Я нормально воспринимаю различия в людях.
67. Общение с другими людьми значимо само по себе.
68. Люблю, когда меня интеллектуально стимулируют.
69. Я люблю организовывать что-либо.
70. Я часто перескакиваю с одного дела на другое.
71. Общение и работа совместно с другими людьми являются творческим процессом.
72. Самоактуализация является крайне важной для меня.
73. Мне очень нравится играть идеями.
74. Я не люблю попусту терять время.
75. Я люблю делать то, что у меня получается.
76. Взаимодействуя с другими, я учусь.
77. Абстракции интересны для меня.
78. Мне нравятся детали.
79. Я люблю кратко подвести итоги, прежде чем прийти к какому-либо умозаключению.
80. Я достаточно уверен в себе.

Обработка результатов.

Обведите те номера, на которые вы ответили положительно, и отметьте их в приведенной ниже таблице. Посчитайте количество баллов по каждому стилю (один положительный ответ равен 1 баллу). Тот стиль, по которому вы набрали наибольшее количество баллов (по одному стилю не может быть более 20 баллов), наиболее предпочтителен для вас. Если вы набрали одинаковое количество баллов по двум стилям, значит, они оба присущи вам.

Ключ

Стиль 1: 1, 8, 9, 13, 17, 24, 26, 31, 33, 40, 41, 48, 50, 53, 57, 63, 65, 70, 74, 79.

Стиль 2: 2, 7, 10, 14, 18, 23, 25, 30, 34, 37, 42, 47, 51, 55, 58, 62, 66, 69, 75, 78.

Стиль 3: 3, 6, 11, 15, 19, 22, 27, 29, 35, 38, 43, 46, 49, 56, 59, 64, 67, 71, 76, 80.

Стиль 4: 4, 5, 12, 16, 20, 21, 28, 32, 36, 39, 44, 45, 52, 54, 60, 61, 68, 72, 73, 77.

Интерпретация результатов

Стиль 1 — ориентация на действие. Характерно обсуждение результатов, конкретных вопросов, поведения, ответственности, опыта, достижений, решений. Люди, владеющие этим стилем, прагматичны, прямолинейны, решительны, легко переключаются с одного вопроса на другой.

Стиль 2 — ориентация на процесс. Характерно обсуждение фактов, процедурных вопросов, планирования, организации, контролирования, деталей. Человек, владеющий этим стилем, ориентирован на систематичность, последовательность, тщательность. Он честен, многословен и мало эмоционален.

Стиль 3 ориентация на людей. Характерно обсуждение человеческих нужд, мотивов, чувств, «духа работы в команде», понимания, сотрудничества. Люди этого стиля эмоциональны, чувствительны, умеют сопереживать окружающим.

Стиль 4 — ориентация на перспективу, на будущее. Людям этого стиля присуще обсуждение концепций, больших планов, нововведений, различных вопросов, новых методов, альтернатив. Они обладают хорошим воображением, полны идей, но мало реалистичны и порой их сложно понять.

Задания:

- а) На основе самодиагностики определите стиль делового общения
- б) Дайте обоснование рекомендаций по совершенствованию делового общения.

ПОДГОТОВКА РЕФЕРАТА

Общая характеристика реферата

Написание реферата практикуется в учебном процессе в целях приобретения магистрантом необходимой профессиональной подготовки, развития умения и навыков самостоятельного научного поиска: изучения литературы по выбранной теме, анализа различных источников и точек зрения, обобщения материала, выделения главного, формулирования выводов и т. п. С помощью реферата магистрант может глубже постигать наиболее сложные проблемы дисциплины, учиться лаконично излагать свои мысли, правильно оформлять работу, докладывать результаты своего труда.

Реферат является первой ступенью на пути освоения навыков проведения научно-исследовательской работы. В «Толковом словаре русского языка» дается следующее определение: **«реферат** – краткое изложение содержания книги, статьи, исследования, а также доклад с таким изложением».

Различают два вида реферата:

- *репродуктивный* – воспроизводит содержание первичного текста в форме реферата-конспекта или реферата-резюме. В реферате-конспекте содержится фактическая информация в обобщённом виде, иллюстрированный материал, различные сведения о методах исследования, результатах исследования и возможностях их применения. В реферате-резюме содержатся только основные положения данной темы;

- *продуктивный* – содержит творческое или критическое осмысление реферируемого источника и оформляются в форме реферата-доклада или реферата-обзора. В реферате-докладе, наряду с анализом информации первоисточника, дается объективная оценка проблемы, и он имеет развёрнутый характер. Реферат-обзор составляется на основе нескольких источников и в нем сопоставляются различные точки зрения по исследуемой проблеме.

Магистрант для изложения материала должен выбрать продуктивный вид реферата.

Выбор темы реферата

Магистранту предоставляется право выбора темы реферата из рекомендованного преподавателем дисциплины списка. Выбор темы должен быть осознанным и обоснованным с точки зрения познавательных интересов автора, а также полноты освещения темы в имеющейся научной литературе.

Если интересующая тема отсутствует в рекомендованном списке, то по согласованию с преподавателем магистранту предоставляется право самостоятельно предложить тему реферата, раскрывающую содержание изучаемой дисциплины. Тема не должна быть слишком общей и глобальной, так как небольшой объем работы (до 20-25 страниц без учёта приложений) не позволит раскрыть ее.

Начинать знакомство с избранной темой лучше всего с чтения обобщающих работ по данной проблеме, постепенно переходя к узкоспециальной литературе. При этом следует сразу же составлять

библиографические выходные данные используемых источников (автор, название, место и год издания, издательство, страницы).

На основе анализа прочитанного и просмотренного материала по данной теме следует составить тезисы по основным смысловым блокам, с пометками, собственными суждениями и оценками. Предварительно подобранный в литературных источниках материал может превышать необходимый объем реферата.

Формулирование цели и составление плана реферата

Выбрав тему реферата и изучив литературу, необходимо сформулировать цель работы и составить план реферата.

Цель – это осознаваемый образ предвосхищаемого результата. Возможно, формулировка цели в ходе работы будет меняться, но изначально следует ее обозначить, чтобы ориентироваться на нее в ходе исследования. Формулирование цели реферата рекомендуется осуществлять при помощи глаголов: исследовать, изучить, проанализировать, систематизировать, осветить, изложить (представления, сведения), создать, рассмотреть, обобщить и т. д.

Определяясь с целью дальнейшей работы, параллельно необходимо думать над составлением плана, при этом четко соотносить цель и план работы. Правильно построенный план помогает систематизировать материал и обеспечить последовательность его изложения.

Наиболее традиционной является следующая **структура реферата**:

Титульный лист.

Оглавление (план, содержание).

Введение.

1. (полное наименование главы).

1.1. (полное название параграфа, пункта);

1.2. (полное название параграфа, пункта). Основная часть

2. (полное наименование главы).

2.1. (полное название параграфа, пункта);

2.2. (полное название параграфа, пункта).

Заключение (выводы).

Библиография (список использованной литературы).

Приложения (по усмотрению автора).

Титульный лист оформляется в соответствии с Приложением.

Оглавление (план, содержание) включает названия всех глав и параграфов (пунктов плана) реферата и номера страниц, указывающие их начало в тексте реферата.

Введение. В этой части реферата обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цель и задачи работы, указываются используемые материалы и дается их краткая характеристика с точки зрения полноты освещения избранной темы. Объем введения не должен превышать 1-1,5 страницы.

Основная часть реферата может быть представлена двумя или тремя главами, которые могут включать 2-3 параграфа (пункта).

Здесь достаточно полно и логично излагаются главные положения в используемых источниках, раскрываются все пункты плана с сохранением связи между ними и последовательности перехода от одного к другому.

Автор должен следить за тем, чтобы изложение материала точно соответствовало цели и названию главы (параграфа). Материал в реферате рекомендуется излагать своими словами, не допуская дословного переписывания из литературных источников. В тексте обязательны ссылки на первоисточники, т. е. на тех авторов, у которых взят данный материал в виде мысли, идеи, вывода, числовых данных, таблиц, графиков, иллюстраций и пр.

Работа должна быть написана грамотным литературным языком. Сокращение слов в тексте не допускается, кроме общеизвестных сокращений и аббревиатуры. Каждый раздел рекомендуется заканчивать кратким выводом.

Заключение (выводы). В этой части обобщается изложенный в основной части материал, формулируются общие выводы, указывается, что нового лично для себя вынес автор реферата из работы над ним. Выводы делаются с учетом опубликованных в литературе различных точек зрения по проблеме рассматриваемой в реферате, сопоставления их и личного мнения автора реферата. Заключение по объему не должно превышать 1,5-2 страниц.

Библиография (список использованной литературы) – здесь указывается реально использованная для написания реферата литература, периодические издания и электронные источники информации. Список составляется согласно правилам библиографического описания.

Приложения могут включать графики, таблицы, расчеты.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РЕФЕРАТА

Общие требования к оформлению реферата

Рефераты по дисциплинам магистратуры направления подготовки 38.04.02 – «Менеджмент», как правило, требуют изучения и анализа значительного объема статистического материала, формул, графиков и т. п. В силу этого особое значение приобретает правильное оформление результатов проделанной работы.

Текст реферата должен быть подготовлен в печатном виде. Исправления и пометки не допускаются. Текст работы оформляется на листах формата А4, на одной стороне листа, с полями: левое – 25 мм, верхнее – 20 мм, правое – 15 мм и нижнее – 25 мм. При компьютерном наборе шрифт должен быть таким: тип шрифта Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал 1,5.

Рекомендуемый объем реферата – не менее 20 страниц. Титульный лист реферата оформляется магистрантом по образцу, данному в приложении 1.

Текст реферата должен быть разбит на разделы: главы, параграфы и т. д. Очередной раздел нужно начинать с нового листа.

Все страницы реферата должны быть пронумерованы. Номер страницы ставится снизу страницы, по центру. Первой страницей является титульный лист, но на ней номер страницы не ставится.

Таблицы

Таблицы по содержанию делятся на аналитические и неаналитические. Аналитические таблицы являются результатом обработки и анализа цифровых показателей. Как правило, после таких таблиц делается обобщение, которое вводится в текст словами: «таблица позволяет сделать вывод о том, что...», «таблица позволяет заключить, что...» и т. п.

В неаналитических таблицах обычно помещаются необработанные статистические данные, необходимые лишь для информации и констатации фактов.

Таблицы размещают после первого упоминания о них в тексте таким образом, чтобы их можно было читать без поворота работы или с поворотом по часовой стрелке.

Каждая таблица должна иметь нумерационный и тематический заголовок. Тематический заголовок располагается по центру таблицы, после нумерационного, размещённого в правой стороне листа и включающего надпись «Таблица» с указанием арабскими цифрами номера таблицы. Нумерация таблиц сквозная в пределах каждой главы. Номер таблицы состоит из двух цифр: первая указывает на номер главы, вторая – на номер таблицы в главе по порядку (например: «Таблица 2.2» – это значит, что представленная таблица вторая во второй главе).

Цифры в графах таблиц должны проставляться так, чтобы разряды чисел во всей графе были расположены один под другим. В одной графе количество десятичных знаков должно быть одинаковым. Если данные отсутствуют, то в графах ставят знак тире. Округление числовых значений величин до первого, второго и т. д. десятичного знака для различных значений одного и того же наименования показателя должно быть одинаковым.

Таблицу с большим количеством строк допускается переносить на другую страницу, при этом заголовок таблицы помещают только над ее первой частью, а над переносимой частью пишут «Продолжение таблицы» или «Окончание таблицы». Если в работе несколько таблиц, то после слов «Продолжение» или «Окончание» указывают номер таблицы, а само слово «таблица» пишут сокращенно, например: «Продолжение табл. 1.1», «Окончание табл. 1.1».

На все таблицы в тексте курсовой работы должны быть даны ссылки с указанием их порядкового номера, например: «...в табл. 2.2».

Формулы

Формулы – это комбинации математических знаков, выражающие какие-либо предложения.

Формулы, приводимые в реферате, должны быть наглядными, а обозначения, применяемые в них, соответствовать стандартам.

Пояснения значений символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой, в той последовательности, в какой они даны в формуле. Значение каждого символа и числового коэффициента дается с новой строки. Первую строку объяснения начинают со слова «где» без двоеточия после него.

Формулы и уравнения следует выделять из текста свободными строками. Если уравнение не умещается в одну строку, оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знака (+), минус (–), умножения (х) и деления (:).

Формулы нумеруют арабскими цифрами в пределах всей курсовой работы (реферата) или главы. В пределах реферата используют нумерацию формул одинарную, в пределах главы – двойную. Номер указывают с правой стороны листа на уровне формулы в круглых скобках.

В тексте ссылки на формулы приводятся с указанием их порядковых номеров, например: «...в формуле (2.2)» (второй формуле второй главы).

Иллюстрации

Иллюстрации позволяют наглядно представить явление или предмет такими, какими мы их зрительно воспринимаем, но без лишних деталей и подробностей.

Основными видами иллюстраций являются схемы, диаграммы и графики.

Схема – это изображение, передающее обычно с помощью условных обозначений и без соблюдения масштаба основную идею какого-либо устройства, предмета, сооружения или процесса и показывающее взаимосвязь их главных элементов.

Диаграмма – один из способов изображения зависимости между величинами. Наибольшее распространение получили линейные, столбиковые и секторные диаграммы.

Для построения линейных диаграмм используется координатное поле. По горизонтальной оси в изображенном масштабе откладывается время или факториальные признаки, на вертикальной – показатели на определенный момент (период) времени или размеры результативного независимого признака. Вершины ординат соединяются отрезками – в результате получается ломаная линия.

На столбиковых диаграммах данные изображаются в виде прямоугольников (столбиков) одинаковой ширины, расположенных вертикально или горизонтально. Длина (высота) прямоугольников пропорциональна изображенным ими величинам.

Секторная диаграмма представляет собой круг, разделенный на секторы, величины которых пропорциональны величинам частей изображаемого явления.

График – это результат обработки числовых данных. Он представляет собой условные изображения величин и их соотношений через геометрические фигуры, точки и линии.

Количество иллюстраций в работе должно быть достаточным для пояснения излагаемого текста.

Иллюстрации обозначаются словом «Рис.» и располагаются после первой ссылки на них в тексте так, чтобы их было удобно рассматривать без поворота

работы или с поворотом по часовой стрелке. Иллюстрации должны иметь номер и наименование, расположенные по центру, под ней. Иллюстрации нумеруются в пределах главы арабскими цифрами, например: «Рис. 1.1» (первый рисунок первой главы). Ссылки на иллюстрации в тексте реферата приводят с указанием их порядкового номера, например: «...на рис. 1.1».

При необходимости иллюстрации снабжаются поясняющими данными (подрисовочный текст).

Приложения

Приложение – это часть основного текста, которая имеет дополнительное (обычно справочное) значение, но, тем не менее, необходима для более полного освещения темы. По форме они могут представлять собой текст, таблицы, графики, карты. В приложении помещают вспомогательные материалы по рассматриваемой теме: инструкции, методики, положения, результаты промежуточных расчетов, типовые проекты, имеющие значительный объем, затрудняющий чтение и целостное восприятие текста. В этом случае в тексте приводятся основные выводы (результаты) и делается ссылка на приложение, содержащее соответствующую информацию. Каждое приложение должно начинаться с новой страницы. В правом верхнем углу листа пишут слово «Приложение» и указывают номер приложения. Если в реферате больше одного приложения, их нумеруют последовательно арабскими цифрами, например: «Приложение 1», «Приложение 2» и т. д.

Каждое приложение должно иметь заголовок, который помещают ниже слова «Приложение» над текстом приложения, по центру.

При ссылке на приложение в тексте реферата пишут сокращенно строчными буквами «прил.» и указывают номер приложения, например: «...в прил. 1».

Приложения оформляются как продолжение текстовой части реферата со сквозной нумерацией листов. Число страниц в приложении не лимитируется и не включается в общий объем страниц реферата.

Библиографический список

Библиографический список должен содержать перечень и описание только тех источников, которые были использованы при написании реферата.

В библиографическом списке должны быть представлены монографические издания отечественных и зарубежных авторов, материалы профессиональной периодической печати (экономических журналов, газет и еженедельников), законодательные и др. нормативно-правовые акты. При составлении списка необходимо обратить внимание на достижение оптимального соотношения между монографическими изданиями, характеризующими глубину теоретической подготовки автора, и периодикой, демонстрирующей владение современными экономическими данными.

Наиболее распространенным способом расположения наименований литературных источников является алфавитный. Работы одного автора перечисляются в алфавитном порядке их названий. Исследования на

иностранных языках помещаются в порядке латинского алфавита после исследований на русском языке.

Ниже приводятся примеры библиографических описаний использованных источников.

Статья одного, двух или трех авторов из журнала

Зотова Л. А., Еременко О. В. Инновации как объект государственного регулирования // *Экономист*. 2010. № 7. С. 17–19.

Статья из журнала, написанная более чем тремя авторами

Валютный курс и экономический рост / С. Ф. Алексащенко, А. А. Клепач, О. Ю. Осипова [и др.] // *Вопросы экономики*. 2010. № 8. С. 18–22.

Книга, написанная одним, двумя или тремя авторами

Иохин В. Я. Экономическая теория: учебник. М.: Юрист, 2009. 178 с.

Книга, написанная более чем тремя авторами

Экономическая теория: учебник / В. Д. Камаев [и др.]. М.: ВЛАДОС, 2011. 143 с.

Сборники

Актуальные проблемы экономики и управления: сборник научных статей. Екатеринбург: УГГУ, 2010. Вып. 9. 146 с.

Статья из сборника

Данилов А. Г. Система ценообразования промышленного предприятия // *Актуальные проблемы экономики и управления: сб. научных статей.* Екатеринбург: УГГУ, 2010. Вып. 9. С. 107–113.

Статья из газеты

Крашаков А. С. Будет ли обвал рубля // *Аргументы и факты*. 2011. № 9. С. 3.

Библиографические ссылки

Библиографические ссылки требуется приводить при цитировании, заимствовании материалов из других источников, упоминании или анализе работ того или иного автора, а также при необходимости адресовать читателя к трудам, в которых рассматривался данный вопрос.

Ссылки должны быть затекстовыми, с указанием номера соответствующего источника (на который автор ссылается в работе) в соответствии с библиографическим списком и соответствующей страницы.

Пример оформления затекстовой ссылки

Ссылка в тексте: «При оценке стоимости земли необходимо учесть все возможности ее производственного использования» [17, С. 191].

В списке использованных источников:

17. *Борисов Е. Ф.* Основы экономики. М.: Юрист, 2008. 308 с.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ РЕФЕРАТА

Необходимо заранее подготовить тезисы выступления (план-конспект).

Порядок защиты реферата.

1. Краткое сообщение, характеризующее цель и задачи работы, ее актуальность, полученные результаты, вывод и предложения.
2. Ответы магистранта на вопросы преподавателя.
3. Отзыв руководителя-консультанта о ходе выполнения работы.

Советы магистранту:

- Готовясь к защите реферата, вы должны вспомнить материал максимально подробно, и это должно найти отражение в схеме вашего ответа. Но тут же необходимо выделить главное, что наиболее важно для понимания материала в целом, иначе вы сможете проговорить все 15-20 минут и не раскрыть существа вопроса. Особенно строго следует отбирать примеры и иллюстрации.

- Вступление должно быть очень кратким – 1-2 фразы (если вы хотите подчеркнуть при этом важность и сложность данного вопроса, то не говорите, что он сложен и важен, а покажите его сложность и важность).

- Целесообразнее вначале показать свою схему раскрытия вопроса, а уж потом ее детализировать.

- Рассказывать будет легче, если вы представите себе, что объясняете материал очень способному и хорошо подготовленному человеку, который не знает именно этого раздела, и что при этом вам обязательно нужно доказать важность данного раздела и заинтересовать в его освоении.

- Строго следите за точностью своих выражений и правильностью употребления терминов.

- Не пытайтесь рассказать побольше за счет ускорения темпа, но и не мямлите.

- Не демонстрируйте излишнего волнения и не напрашивайтесь на сочувствие.

- Будьте особенно внимательны ко всем вопросам преподавателя, к малейшим его замечаниям. И уж ни в коем случае его не перебивайте!

- Не бойтесь дополнительных вопросов – чаще всего преподаватель использует их как один из способов помочь вам или сэкономить время. Если вас прервали, а при оценке ставят в вину пропуск важной части материала, не возмущайтесь, а покажите план своего ответа, где эта часть стоит несколько позже того, на чем вы были прерваны.

- Прежде чем отвечать на дополнительный вопрос, необходимо сначала правильно его понять. Для этого нужно хотя бы немного подумать, иногда переспросить, уточнить: правильно ли вы поняли поставленный вопрос. И при ответе следует соблюдать тот же принцип экономности мышления, а не высказывать без разбора все, что вы можете сказать.

- Будьте доброжелательны и тактичны, даже если к ответу вы не готовы (это вина не преподавателя, а ваша).

ТЕМЫ РЕФЕРАТА

1. Общение как социально-психологическая категория.
2. Коммуникативная культура в деловом общении.
3. Условия общения и причины коммуникативных неудач.
4. Роль невербальных компонентов в речевом общении.
5. Речевой этикет, его основные функции и правила.
6. Причины отступлений от норм в речи, типы речевых ошибок, пути их устранения и предупреждения.
7. Деловая беседа (цели, задачи, виды, структура).
8. Особенности телефонного разговора.
9. Новые тенденции в практике русского делового письма.
10. Культура дискусивно-полемиической речи. Виды споров, приемы и уловки в споре
11. Основные правила эффективного общения.
12. Личность как субъект общения. Коммуникативная компетентность личности.
13. Конфликтное поведение и причины его возникновения в деструктивном взаимодействии.
14. Деловое общение и управление им.
15. Отношения сотрудничества и конфликта в представлениях российских работников.
16. Реформы в России и проблемы общения молодого поколения и работодателей.
17. Культура речи в деловом общении.
18. Содержание закона конгруэнтности и его роль в деловом общении.
19. Этика использования средств выразительности деловой речи.
20. Особенности речевого поведения.
21. Культура устной и письменной речи делового человека в современной России.
22. Вербальные конфликтогены в практике современного российского общества.
23. Этические нормы телефонного разговора.
24. Основные тенденции развития Российской деловой культуры.
25. Характеристика манипуляций в общении.
26. Приемы, стимулирующие общение и создание доверительных отношений.
27. Правила подготовки публичного выступления.
28. Правила подготовки и проведения деловой беседы.
29. Типология конфликтных личностей и способы общения с ними.
30. Этикет и имидж делового человека.

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к зачету по дисциплине *«Средства коммуникации в учебной и профессиональной деятельности»* обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить информацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины *«Средства коммуникации в учебной и профессиональной деятельности»*.

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во-первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому
комплексу С.А.Упоров



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

ФТД.В.03 ОСНОВЫ СОЦИАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ И ПРАВОВЫХ ЗНАНИЙ

Направление
15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль
Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрена на заседании кафедры

Управления персоналом
(название кафедры)
Зав.кафедрой _____
(подпись)
Абрамов С.М.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 10.09.2023
(Дата)

Рассмотрена методической комиссией

Горно-механического факультета
(название факультета)
Председатель _____
(подпись)
Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 20.10.2023
(Дата)

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Методические рекомендации по решению практико-ориентированных заданий	5
2 Методические указания по подготовке к опросу	9
3 Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям	11
4 Методические рекомендации по подготовке семинарским занятиям	13
5 Методические рекомендации по подготовке к сдаче экзаменов и зачетов	14
Заключение	17
Список использованных источников	18

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студентов может рассматриваться как организационная форма обучения - система педагогических условий, обеспечивающих управление учебной деятельностью студентов по освоению знаний и умений в области учебной и научной деятельности без посторонней помощи.

Самостоятельная работа студентов проводится с целью:

- систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубления и расширения теоретических знаний;
- формирования умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развития познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирования самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- формирования практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развития исследовательских умений;
- получения навыков эффективной самостоятельной профессиональной (практической и научно-теоретической) деятельности.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы:

- аудиторная;
- внеаудиторная.

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Внеаудиторная самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

Самостоятельная работа, не предусмотренная образовательной программой, учебным планом и учебно-методическими материалами, раскрывающими и конкретизирующими их содержание, осуществляется студентами инициативно, с целью реализации собственных учебных и научных интересов.

Для более эффективного выполнения самостоятельной работы по дисциплине преподаватель рекомендует студентам источники и учебно-методические пособия для работы, характеризует наиболее рациональную методику самостоятельной работы, демонстрирует ранее выполненные студентами работы и т. п.

Подразумевается несколько категорий видов самостоятельной работы студентов, значительная часть которых нашла отражения в данных методических рекомендациях:

- работа с источниками литературы и официальными документами (*использование библиотечно-информационной системы*);
- выполнение заданий для самостоятельной работы в рамках учебных дисциплин (*рефераты, эссе, домашние задания, решения практико-ориентированных заданий*);

- реализация элементов научно-педагогической практики (*разработка методических материалов, тестов, тематических портфолио*);
- реализация элементов научно-исследовательской практики (*подготовка текстов докладов, участие в исследованиях*).

Особенностью организации самостоятельной работы студентов является необходимость не только подготовиться к сдаче зачета, но и собрать, обобщить, систематизировать, проанализировать информацию по темам дисциплины.

Технология организации самостоятельной работы студентов включает использование информационных и материально-технических ресурсов образовательного учреждения.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов online и на занятиях в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы студентов могут быть использованы обмен информационными файлами, семинарские занятия, тестирование, опрос, доклад, реферат, самоотчеты, контрольные работы, защита творческих работ и электронных презентаций и др.

Контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине.

1. Методические рекомендации по решению практико-ориентированных заданий

Практико-ориентированные задания - метод анализа ситуаций. Суть его заключается в том, что студентам предлагают осмыслить реальную жизненную ситуацию, описание которой одновременно отражает не только какую-либо практическую проблему, но и актуализирует определенный комплекс знаний, который необходимо усвоить при разрешении данной проблемы. При этом сама проблема не имеет однозначных решений.

Использование метода практико-ориентированного задания как образовательной технологии профессионально-ориентированного обучения представляет собой сложный процесс, плохо поддающийся алгоритмизации¹. Формально можно выделить следующие этапы:

- ознакомление студентов с текстом;
- анализ практико-ориентированного задания;
- организация обсуждения практико-ориентированного задания, дискуссии, презентации;
- оценивание участников дискуссии;
- подведение итогов дискуссии.

Ознакомление студентов с текстом практико-ориентированного задания и последующий анализ практико-ориентированного задания чаще всего осуществляются за несколько дней до его обсуждения и реализуются как самостоятельная работа студентов; при этом время, отводимое на подготовку, определяется видом практико-ориентированного задания, его объемом и сложностью.

Общая схема работы с практико-ориентированным заданием на данном этапе может быть представлена следующим образом: в первую очередь следует выявить ключевые проблемы практико-ориентированного задания и понять, какие именно из представленных данных важны для решения; войти в ситуационный контекст практико-ориентированного задания, определить, кто его главные действующие лица, отобрать факты и понятия, необходимые для анализа, понять, какие трудности могут возникнуть при решении задачи; следующим этапом является выбор метода исследования.

Знакомство с небольшими практико-ориентированными заданиями и их обсуждение может быть организовано непосредственно на занятиях. Принципиально важным в этом случае является то, чтобы часть теоретического курса, на которой базируется практико-ориентированное задание, была бы прочитана и проработана студентами.

Максимальная польза из работы над практико-ориентированными заданиями будет извлечена в том случае, если аспиранты при предварительном знакомстве с ними будут придерживаться систематического подхода к их анализу, основные шаги которого представлены ниже:

1. Выпишите из соответствующих разделов учебной дисциплины ключевые идеи, для того, чтобы освежить в памяти теоретические концепции и подходы, которые Вам предстоит использовать при анализе практико-ориентированного задания.
2. Бегло прочтите практико-ориентированное задание, чтобы составить о нем общее представление.
3. Внимательно прочтите вопросы к практико-ориентированному заданию и убедитесь в том, что Вы хорошо поняли, что Вас просят сделать.
4. Вновь прочтите текст практико-ориентированного задания, внимательно фиксируя все факторы или проблемы, имеющие отношение к поставленным вопросам.
5. Прикиньте, какие идеи и концепции соотносятся с проблемами, которые Вам предлагается рассмотреть при работе с практико-ориентированным заданием.

¹ Долгоруков А. Метод case-study как современная технология профессионально -ориентированного обучения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://evolkov.net/case/case.study.html/>

Организация обсуждения практико-ориентированного задания предполагает формулирование перед студентами вопросов, включение их в дискуссию. Вопросы обычно подготавливают заранее и предлагают студентам вместе с текстом практико-ориентированного задания. При разборе учебной ситуации преподаватель может занимать активную или пассивную позицию, иногда он «дирижирует» разбором, а иногда ограничивается подведением итогов дискуссии.

Организация обсуждения практико-ориентированных заданий обычно основывается на двух методах. Первый из них носит название традиционного Гарвардского метода - открытая дискуссия. Альтернативным методом является метод, связанный с индивидуальным или групповым опросом, в ходе которого аспиранты делают формальную устную оценку ситуации и предлагают анализ представленного практико-ориентированного задания, свои решения и рекомендации, т.е. делают презентацию. Этот метод позволяет некоторым студентам минимизировать их учебные усилия, поскольку каждый аспирант опрашивается один-два раза за занятие. Метод развивает у студентов коммуникативные навыки, учит их четко выражать свои мысли. Однако, этот метод менее динамичен, чем Гарвардский метод. В открытой дискуссии организация и контроль участников более сложен.

Дискуссия занимает центральное место в методе. Ее целесообразно использовать в том случае, когда аспиранты обладают значительной степенью зрелости и самостоятельности мышления, умеют аргументировать, доказывать и обосновывать свою точку зрения. Важнейшей характеристикой дискуссии является уровень ее компетентности, который складывается из компетентности ее участников. Неподготовленность студентов к дискуссии делает ее формальной, превращает в процесс вытаскивания ими информации у преподавателя, а не самостоятельное ее добывание.

Особое место в организации дискуссии при обсуждении и анализе практико-ориентированного задания принадлежит использованию метода генерации идей, получившего название «мозговой атаки» или «мозгового штурма».

Метод «мозговой атаки» или «мозгового штурма» был предложен в 30-х годах прошлого столетия А. Осборном как групповой метод решения проблем. К концу XX столетия этот метод приобрел особую популярность в практике управления и обучения не только как самостоятельный метод, но и как использование в процессе деятельности с целью усиления ее продуктивности. В процессе обучения «мозговая атака» выступает в качестве важнейшего средства развития творческой активности студентов. «Мозговая атака» включает в себя три фазы.

Первая фаза представляет собой вхождение в психологическую раскованность, отказ от стереотипности, страха показаться смешным и неудачником; достигается созданием благоприятной психологической обстановки и взаимного доверия, когда идеи теряют авторство, становятся общими. Основная задача этой фазы - успокоиться и расковаться.

Вторая фаза - это собственно атака; задача этой фазы - породить поток, лавину идей. «Мозговая атака» в этой фазе осуществляется по следующим принципам:

- есть идея, - говорю, нет идеи, - не молчу;
- поощряется самое необузданное ассоциирование, чем более дикой покажется идея, тем лучше;
- количество предложенных идей должно быть как можно большим;
- высказанные идеи разрешается заимствовать и как угодно комбинировать, а также видоизменять и улучшать;
- исключается критика, можно высказывать любые мысли без боязни, что их признают плохими, критикующих лишают слова;
- не имеют никакого значения социальные статусы участников; это абсолютная демократия и одновременно авторитаризм сумасшедшей идеи;
- все идеи записываются в протокольный список идей;

- время высказываний - не более 1-2 минут.

Третья фаза представляет собой творческий анализ идей с целью поиска конструктивного решения проблемы по следующим правилам:

- анализировать все идеи без дискриминации какой-либо из них;
- найти место идее в системе и найти систему под идею;
- не умножать сущностей без надобности;
- не должна нарушаться красота и изящество полученного результата;
- должно быть принципиально новое видение;
- ищи «жемчужину в навозе».

В методе мозговая атака применяется при возникновении у группы реальных затруднений в осмыслении ситуации, является средством повышения активности студентов. В этом смысле мозговая атака представляется не как инструмент поиска новых решений, хотя и такая ее роль не исключена, а как своеобразное «подталкивание» к познавательной активности.

Презентация, или представление результатов анализа практико-ориентированного задания, выступает очень важным аспектом метода *case-study*. Умение публично представить интеллектуальный продукт, хорошо его рекламировать, показать его достоинства и возможные направления эффективного использования, а также выстоять под шквалом критики, является очень ценным интегральным качеством современного специалиста. Презентация оттачивает многие глубинные качества личности: волю, убежденность, целенаправленность, достоинство и т.п.; она вырабатывает навыки публичного общения, формирования своего собственного имиджа.

Публичная (устная) презентация предполагает представление решений практико-ориентированного задания группе, она максимально вырабатывает навыки публичной деятельности и участия в дискуссии. Устная презентация обладает свойством кратковременного воздействия на студентов и, поэтому, трудна для восприятия и запоминания. Степень подготовленности выступающего проявляется в спровоцированной им дискуссии: для этого необязательно делать все заявления очевидными и неопровержимыми. Такая подача материала при анализе практико-ориентированного задания может послужить началом дискуссии. При устной презентации необходимо учитывать эмоциональный настрой выступающего: отношение и эмоции говорящего вносят существенный вклад в сообщение. Одним из преимуществ публичной (устной) презентации является ее гибкость. Оратор может откликаться на изменения окружающей обстановки, адаптировать свой стиль и материал, чувствуя настроение аудитории.

Непубличная презентация менее эффективна, но обучающая роль ее весьма велика. Чаще всего непубличная презентация выступает в виде подготовки отчета по выполнению задания, при этом стимулируются такие качества, как умение подготовить текст, точно и аккуратно составить отчет, не допустить ошибки в расчетах и т.д. Подготовка письменного анализа практико-ориентированного задания аналогична подготовке устного, с той разницей, что письменные отчеты-презентации обычно более структурированы и детализированы. Основное правило письменного анализа практико-ориентированного задания заключается в том, чтобы избежать простого повторения информации из текста, информация должна быть представлена в переработанном виде. Самым важным при этом является собственный анализ представленного материала, его соответствующая интерпретация и сделанные предложения. Письменный отчет - презентация может сдаваться по истечении некоторого времени после устной презентации, что позволяет студентам более тщательно проанализировать всю информацию, полученную в ходе дискуссии.

Как письменная, так и устная презентация результатов анализа практико-ориентированного задания может быть групповая и индивидуальная. Отчет может быть индивидуальным или групповым в зависимости от сложности и объема задания. Индивидуальная презентация формирует ответственность, собранность, волю;

групповая - аналитические способности, умение обобщать материал, системно видеть проект.

Оценивание участников дискуссии является важнейшей проблемой обучения посредством метода практико-ориентированного задания. При этом выделяются следующие требования к оцениванию:

- объективность - создание условий, в которых бы максимально точно выявлялись знания обучаемых, предъявление к ним единых требований, справедливое отношение к каждому;
- обоснованность оценок - их аргументация;
- систематичность - важнейший психологический фактор, организующий и дисциплинирующий студентов, формирующий настойчивость и устремленность в достижении цели;
- всесторонность и оптимальность.

Оценивание участников дискуссии предполагает оценивание не столько набора определенных знаний, сколько умения студентов анализировать конкретную ситуацию, принимать решение, логически мыслить.

Следует отметить, что оценивается содержательная активность студента в дискуссии или публичной (устной) презентации, которая включает в себя следующие составляющие:

- выступление, которое характеризует попытку серьезного предварительного
- анализа (правильность предложений, подготовленность,
- аргументированность и т.д.);
- обращение внимания на определенный круг вопросов, которые требуют углубленного обсуждения;
- владение категориальным аппаратом, стремление давать определения, выявлять содержание понятий;
- демонстрация умения логически мыслить, если точки зрения, высказанные раньше, подытоживаются и приводят к логическим выводам;
- предложение альтернатив, которые раньше оставались без внимания;
- предложение определенного плана действий или плана воплощения решения;
- определение существенных элементов, которые должны учитываться при анализе практико-ориентированного задания;
- заметное участие в обработке количественных данных, проведении расчетов;
- подведение итогов обсуждения.

При оценивании анализа практико-ориентированного задания, данного студентами при непубличной (письменной) презентации учитывается:

- формулировка и анализ большинства проблем, имеющих в практико-ориентированное задание;
- формулировка собственных выводов на основании информации о практико-ориентированное задание, которые отличаются от выводов других студентов;
- демонстрация адекватных аналитических методов для обработки информации;
- соответствие приведенных в итоге анализа аргументов ранее выявленным проблемам, сделанным выводам, оценкам и использованным аналитическим методам.

2. Методические указания по подготовке к опросу

Самостоятельная работа обучающихся включает подготовку к устному или письменному опросу на семинарских занятиях. Для этого обучающийся изучает лекции, основную и дополнительную литературу, публикации, информацию из Интернет-ресурсов. Темы и вопросы к семинарским занятиям, вопросы для самоконтроля приведены в методических указаниях по разделам и доводятся до обучающихся заранее.

Письменный опрос

В соответствии с технологической картой письменный опрос является одной из форм текущего контроля успеваемости студента по данной дисциплине. При подготовке к письменному опросу студент должен внимательно изучать лекции, основную и дополнительную литературу, публикации, информацию из Интернет-ресурсов. Темы и вопросы к семинарским занятиям, вопросы для самоконтроля приведены в методических указаниях по разделам и доводятся до обучающихся заранее.

При изучении материала студент должен убедиться, что хорошо понимает основную терминологию темы, умеет ее использовать в нужном контексте. Желательно составить краткий конспект ответа на предполагаемые вопросы письменной работы, чтобы убедиться в том, что студент владеет материалом и может аргументировано, логично и грамотно письменно изложить ответ на вопрос. Следует обратить особое внимание на написание профессиональных терминов, чтобы избежать грамматических ошибок в работе. При изучении новой для студента терминологии рекомендуется изготовить карточки, которые содержат новый термин и его расшифровку, что значительно облегчит работу над материалом.

Устный опрос

Целью устного собеседования являются обобщение и закрепление изученного курса. Студентам предлагаются для освещения сквозные концептуальные проблемы. При подготовке следует использовать лекционный материал и учебную литературу. Для более глубокого постижения курса и более основательной подготовки рекомендуется познакомиться с указанной дополнительной литературой. Готовясь к семинару, студент должен, прежде всего, ознакомиться с общим планом семинарского занятия. Следует внимательно прочесть свой конспект лекции по изучаемой теме и рекомендуемую к теме семинара литературу. С незнакомыми терминами и понятиями следует ознакомиться в предлагаемом глоссарии, словаре или энциклопедии².

Критерии качества устного ответа.

1. Правильность ответа по содержанию.
2. Полнота и глубина ответа.
3. Сознательность ответа (учитывается понимание излагаемого материала).
4. Логика изложения материала (учитывается умение строить целостный, последовательный рассказ, грамотно пользоваться профессиональной терминологией).
5. Рациональность использованных приемов и способов решения поставленной учебной задачи (учитывается умение использовать наиболее прогрессивные и эффективные способы достижения цели).
6. Своевременность и эффективность использования наглядных пособий и технических средств при ответе (учитывается грамотно и с пользой применять наглядность и демонстрационный опыт при устном ответе).
7. Использование дополнительного материала (приветствуется, но не обязательно для всех студентов).

²Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://lesgaft.spb.ru/sites/default/files/u57/metod.rekomendacii_dlya_studentov_21.pdf

8. Рациональность использования времени, отведенного на задание (не одобряется затянутость выполнения задания, устного ответа во времени, с учетом индивидуальных особенностей студентов)³.

Ответ на каждый вопрос из плана семинарского занятия должен быть содержательным и аргументированным. Для этого следует использовать документы, монографическую, учебную и справочную литературу.

Для успешной подготовки к устному опросу, студент должен законспектировать рекомендуемую литературу, внимательно осмыслить лекционный материал и сделать выводы. В среднем, подготовка к устному опросу по одному семинарскому занятию занимает от 2 до 4 часов в зависимости от сложности темы и особенностей организации обучающимся своей самостоятельной работы.

3.Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям

На практических занятиях необходимо стремиться к самостоятельному решению задач, находя для этого более эффективные методы. При этом студентам надо приучить себя доводить решения задач до конечного «идеального» ответа. Это очень важно для

³Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]:
http://priab.ru/images/metod_agro/Metod_Inostran_yazyk_35.03.04_Agro_15.01.2016.pdf

будущих специалистов. Практические занятия вырабатывают навыки самостоятельной творческой работы, развивают мыслительные способности.

Практическое занятие – активная форма учебного процесса, дополняющая теоретический курс или лекционную часть учебной дисциплины и призванная помочь обучающимся освоиться в «пространстве» (тематике) дисциплины, самостоятельно прооперировать теоретическими знаниями на конкретном учебном материале.

Продолжительность одного практического занятия – от 2 до 4 академических часов. Общая доля практических занятий в учебном времени на дисциплину – от 10 до 20 процентов (при условии, что все активные формы займут в учебном времени на дисциплину от 40 до 60 процентов).

Для практического занятия в качестве темы выбирается обычно такая учебная задача, которая предполагает не существенные эвристические и аналитические напряжения и продвижения, а потребность обучающегося «потрогать» материал, опознать в конкретном то общее, о чем говорилось в лекции. Например, при рассмотрении вопросов оплаты труда, мотивации труда и проблем безработицы в России имеет смысл провести практические занятия со следующими сюжетами заданий: «Расчет заработной платы работников предприятия». «Разработка механизма мотивации труда на предприятии N». «В чем причины и особенности безработицы в России?». Последняя тема предполагает уже некоторую аналитическую составляющую. Основная задача первой из этих тем – самим посчитать заработную плату для различных групп работников на примере заданных параметров для конкретного предприятия, т. е. сделать расчеты «как на практике»; второй – дать собственный вариант мотивационной политики для предприятия, учитывая особенности данного объекта, отрасли и т.д.; третьей – опираясь на теоретические знания в области проблем занятости и безработицы, а также статистические материалы, сделать авторские выводы о видах безработицы, характерных для России, и их причинах, а также предложить меры по минимизации безработицы.

Перед проведением занятия должен быть подготовлен специальный материал – тот объект, которым обучающиеся станут оперировать, активизируя свои теоретические (общие) знания и тем самым, приобретая навыки выработки уверенных суждений и осуществления конкретных действий.

Дополнительный материал для практического занятия лучше получить у преподавателя заранее, чтобы у студентов была возможность просмотреть его и подготовить вопросы.

Условия должны быть такими, чтобы каждый мог работать самостоятельно от начала до конца. В аудитории должны быть «под рукой» необходимые справочники и тексты законов и нормативных актов по тематике занятия. Чтобы сделать практическое занятие максимально эффективным, надо заранее подготовить и изучить материал по наиболее интересным и практически важным темам.

Особенности практического занятия с использованием компьютера

Для того чтобы повысить эффективность проведения практического занятия, может использоваться компьютер по следующим направлениям:

- поиск информации в Интернете по поставленной проблеме: в этом случае преподаватель представляет обучающимся перечень рекомендуемых для посещения Интернет-сайтов;
- использование прикладных обучающих программ;
- выполнение заданий с использованием обучающимися заранее установленных преподавателем программ;
- использование программного обеспечения при проведении занятий, связанных с моделированием социально-экономических процессов.

4.Методические рекомендации по подготовке семинарским занятиям

Семинар представляет собой комплексную форму и завершающее звено в изучении определенных тем, предусмотренных программой учебной дисциплины. Комплексность данной формы занятий определяется тем, что в ходе её проведения сочетаются выступления обучающихся и преподавателя: рассмотрение обсуждаемой проблемы и анализ различных, часто дискуссионных позиций; обсуждение мнений обучающихся и разъяснение (консультация) преподавателя; углубленное изучение теории и приобретение навыков умения ее использовать в практической работе.

По своему назначению семинар, в процессе которого обсуждается та или иная научная проблема, способствует:

- углубленному изучению определенного раздела учебной дисциплины, закреплению знаний;
- отработке методологии и методических приемов познания;
- выработке аналитических способностей, умения обобщения и формулирования выводов;
- приобретению навыков использования научных знаний в практической деятельности;
- выработке умения кратко, аргументированно и ясно излагать обсуждаемые вопросы;
- осуществлению контроля преподавателя за ходом обучения.

Семинары представляет собой дискуссию в пределах обсуждаемой темы (проблемы). Дискуссия помогает участникам семинара приобрести более совершенные знания, проникнуть в суть изучаемых проблем. Выработать методологию, овладеть методами анализа социально-экономических процессов. Обсуждение должно носить творческий характер с четкой и убедительной аргументацией.

По своей структуре семинар начинается со вступительного слова преподавателя, в котором кратко излагаются место и значение обсуждаемой темы (проблемы) в данной дисциплине, напоминаются порядок и направления ее обсуждения. Конкретизируется ранее известный обучающимся план проведения занятия. После этого начинается процесс обсуждения вопросов обучающимися. Завершается занятие заключительным словом преподавателя.

Проведение семинарских занятий в рамках учебной группы (20 - 25 человек) позволяет обеспечить активное участие в обсуждении проблемы всех присутствующих.

По ходу обсуждения темы помните, что изучение теории должно быть связано с определением (выработкой) средств, путей применения теоретических положений в практической деятельности, например, при выполнении функций государственного служащего. В то же время важно не свести обсуждение научной проблемы только к пересказу случаев из практики работы, к критике имеющих место недостатков. Дискуссии имеют важное значение: учат дисциплине ума, умению выступать по существу, мыслить логически, выделяя главное, критически оценивать выступления участников семинара.

В процессе проведения семинара обучающиеся могут использовать разнообразные по своей форме и характеру пособия (от доски смелом до самых современных технических средств), демонстрируя фактический, в том числе статистический материал, убедительно подтверждающий теоретические выводы и положения. В завершение обсудите результаты работы семинара и сделайте выводы, что хорошо усвоено, а над чем следует дополнительно поработать.

В целях эффективности семинарских занятий необходима обстоятельная подготовка к их проведению. В начале семестра (учебного года) возьмите в библиотеке необходимые методические материалы для своевременной подготовки к семинарам. Во время лекций, связанных с темой семинарского занятия, следует обращать внимание на то, что необходимо дополнительно изучить при подготовке к семинару (новые официальные документы, статьи в периодических журналах, вновь вышедшие монографии и т.д.).

5. Методические рекомендации по подготовке к сдаче экзаменов и зачетов

Экзамен - одна из важнейших частей учебного процесса, имеющая огромное значение.

Во-первых, готовясь к экзамену, студент приводит в систему знания, полученные на лекциях, семинарах, практических и лабораторных занятиях, разбирается в том, что осталось непонятым, и тогда изучаемая им дисциплина может быть воспринята в полном объеме с присущей ей строгостью и логичностью, ее практической направленностью. А это чрезвычайно важно для будущего специалиста.

Во-вторых, каждый хочет быть волевым и сообразительным., выдержанным и целеустремленным, иметь хорошую память, научиться быстро находить наиболее рациональное решение в трудных ситуациях. Очевидно, что все эти качества не только украшают человека, но и делают его наиболее действенным членом коллектива. Подготовка и сдача экзамена помогают студенту глубже усвоить изучаемые дисциплины, приобрести навыки и качества, необходимые хорошему специалисту.

Конечно, успех на экзамене во многом обусловлен тем, насколько систематически и глубоко работал студент в течение семестра. Совершенно очевидно, что серьезно продумать и усвоить содержание изучаемых дисциплин за несколько дней подготовки к экзамену просто невозможно даже для очень способного студента. И, кроме того, хорошо известно, что быстро выученные на память разделы учебной дисциплины так же быстро забываются после сдачи экзамена.

При подготовке к экзамену студенты не только повторяют и дорабатывают материал дисциплины, которую они изучали в течение семестра, они обобщают полученные знания, осмысливают методологию предмета, его систему, выделяют в нем основное и главное, воспроизводят общую картину с тем, чтобы яснее понять связь между отдельными элементами дисциплины. Вся эта обобщающая работа проходит в условиях напряжения воли и сознания, при значительном отвлечении от повседневной жизни, т. е. в условиях, благоприятствующих пониманию и запоминанию.

Подготовка к экзаменам состоит в приведении в порядок своих знаний. Даже самые способные студенты не в состоянии в короткий период зачетно-экзаменационной сессии усвоить материал целого семестра, если они над ним не работали в свое время. Для тех, кто мало занимался в семестре, экзамены принесут мало пользы: что быстро пройдено, то быстро и забудется. И хотя в некоторых случаях студент может «проскочить» через экзаменационный барьер, в его подготовке останется серьезный пробел, трудно восполняемый впоследствии.

Определив назначение и роль экзаменов в процессе обучения, попытаемся на этой основе пояснить, как лучше готовиться к ним.

Экзаменам, как правило, предшествует защита курсовых работ (проектов) и сдача зачетов. К экзаменам допускаются только студенты, защитившие все курсовые работы (проекты) и сдавшие все зачеты. В вузе сдача зачетов организована так, что при систематической работе в течение семестра, своевременной и успешной сдаче всех текущих работ, предусмотренных графиком учебного процесса, большая часть зачетов не вызывает повышенной трудности у студента. Студенты, работавшие в семестре по плану, подходят к экзаменационной сессии без напряжения, без излишней затраты сил в последнюю, «зачетную» неделю.

Подготовку к экзамену следует начинать с первого дня изучения дисциплины. Как правило, на лекциях подчеркиваются наиболее важные и трудные вопросы или разделы дисциплины, требующие внимательного изучения и обдумывания. Нужно эти вопросы выделить и обязательно постараться разобраться в них, не дожидаясь экзамена, проработать их, готовясь к семинарам, практическим или лабораторным занятиям, попробовать самостоятельно решить несколько типовых задач. И если, несмотря на это, часть материала осталась неувоенной, ни в коем случае нельзя успокаиваться, надеясь на

то, что это не попадется на экзамене. Факты говорят об обратном; если те или другие вопросы учебной дисциплины не вошли в экзаменационный билет, преподаватель может их задать (и часто задает) в виде дополнительных вопросов.

Точно такое же отношение должно быть выработано к вопросам и задачам, перечисленным в программе учебной дисциплины, выдаваемой студентам в начале семестра. Обычно эти же вопросы и аналогичные задачи содержатся в экзаменационных билетах. Не следует оставлять без внимания ни одного раздела дисциплины: если не удалось в чем-то разобраться самому, нужно обратиться к товарищам; если и это не помогло выяснить какой-либо вопрос до конца, нужно обязательно задать этот вопрос преподавателю на предэкзаменационной консультации. Чрезвычайно важно приучить себя к умению самостоятельно мыслить, учиться думать, понимать суть дела. Очень полезно после проработки каждого раздела восстановить в памяти содержание изученного материала, кратко записав это на листе бумаги, создать карту памяти (умственную карту), изобразить необходимые схемы и чертежи (логико-графические схемы), например, отобразить последовательность вывода теоремы или формулы. Если этого не сделать, то большая часть материала останется не понятой, а лишь формально заученной, и при первом же вопросе экзаменатора студент убедится в том, насколько поверхностно он усвоил материал.

В период экзаменационной сессии происходит резкое изменение режима работы, отсутствует посещение занятий по расписанию. При всяком изменении режима работы очень важно скорее приспособиться к новым условиям. Поэтому нужно сразу выбрать такой режим работы, который сохранился бы в течение всей сессии, т. е. почти на месяц. Необходимо составить для себя новый распорядок дня, чередуя занятия с отдыхом. Для того чтобы сократить потерю времени на включение в работу, рабочие периоды целесообразно делать длительными, разделив день примерно на три части: с утра до обеда, с обеда до ужина и от ужина до сна.

Каждый рабочий период дня надо заканчивать отдыхом. Наилучший отдых в период экзаменационной сессии - прогулка, кратковременная пробежка или какой-либо неустойчивый физический труд.

При подготовке к экзаменам основное направление дают программа учебной дисциплины и студенческий конспект, которые указывают, что наиболее важно знать и уметь делать. Основной материал должен прорабатываться по учебнику (если такой имеется) и учебным пособиям, так как конспекта далеко недостаточно для изучения дисциплины. Учебник должен быть изучен в течение семестра, а перед экзаменом сосредоточьте внимание на основных, наиболее сложных разделах. Подготовку по каждому разделу следует заканчивать восстановлением по памяти его краткого содержания в логической последовательности.

За один - два дня до экзамена назначается консультация. Если ее правильно использовать, она принесет большую пользу. Во время консультации студент имеет полную возможность получить ответ на нее и ясные ему вопросы. А для этого он должен проработать до консультации все темы дисциплины. Кроме того, преподаватель будет отвечать на вопросы других студентов, что будет для вас повторением и закреплением знаний. И еще очень важное обстоятельство: преподаватель на консультации, как правило, обращает внимание на те вопросы, по которым на предыдущих экзаменах ответы были неудовлетворительными, а также фиксирует внимание на наиболее трудных темах дисциплины. Некоторые студенты не приходят на консультации либо потому, что считают, что у них нет вопросов к преподавателю, либо полагают, что у них и так мало времени и лучше самому прочитать материал в конспекте или в учебнике. Это глубокое заблуждение. Никакая другая работа не сможет принести столь значительного эффекта накануне экзамена, как консультация преподавателя.

Но консультация не может возместить отсутствия длительной работы в течение семестра и помочь за несколько часов освоить материал, требующийся к экзамену. На консультации студент получает ответы на трудные или оставшиеся неясными вопросы и, следовательно, дорабатывается материал. Консультации рекомендуется посещать,

подготовив к ним все вопросы, вызывающие сомнения. Если студент придет на консультацию, не проработав всего материала, польза от такой консультации будет невелика.

Очень важным условием для правильного режима работы в период экзаменационной сессии является нормальный сон. Подготовка к экзамену не должна идти в ущерб сну, иначе в день экзамена не будет чувства свежести и бодрости, необходимых для хороших ответов. Вечер накануне экзамена рекомендуем закончить небольшой прогулкой.

Итак, *основные советы* для подготовки к сдаче зачетов и экзаменов состоят в следующем:

- лучшая подготовка к зачетам и экзаменам - равномерная работа в течение всего семестра;
- используйте программы учебных дисциплин - это организует вашу подготовку к зачетам и экзаменам;
- учитывайте, что для полноценного изучения учебной дисциплины необходимо время;
- составляйте планы работы во времени;
- работайте равномерно и ритмично;
- курсовые работы (проекты) желательно защищать за одну - две недели до начала зачетно-экзаменационной сессии;
- все зачеты необходимо сдавать до начала экзаменационной сессии;
- помните, что конспект не заменяет учебник и учебные пособия, а помогает выбрать из него основные вопросы и ответы;
- при подготовке наибольшее внимание и время уделяйте трудным и непонятным вопросам учебной дисциплины;
- грамотно используйте консультации;
- соблюдайте правильный режим труда и отдыха во время сессии, это сохранит работоспособность и даст хорошие результаты;
- учитесь владеть собой на зачете и экзамене;
- учитесь точно и кратко передавать свои мысли, поясняя их, если нужно, логико-графическими схемами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методические указания по выполнению самостоятельной работы обучающихся являются неотъемлемой частью процесса обучения в вузе. Правильная организация самостоятельной работы позволяет обучающимся развивать умения и навыки в усвоении и систематизации приобретаемых знаний, обеспечивает высокий уровень успеваемости в период обучения, способствует формированию навыков совершенствования профессионального мастерства. Также внеаудиторное время включает в себя подготовку к аудиторным занятиям и изучение отдельных тем, расширяющих и углубляющих представления обучающихся по разделам изучаемой дисциплины.

Таким образом, обучающийся используя методические указания может в достаточном объеме усвоить и успешно реализовать конкретные знания, умения, навыки и получить опыт при выполнении следующих условий:

- 1) систематическая самостоятельная работа по закреплению полученных знаний и навыков;
- 2) добросовестное выполнение заданий;
- 3) выяснение и уточнение отдельных предпосылок, умозаключений и выводов, содержащихся в учебном курсе;
- 4) сопоставление точек зрения различных авторов по затрагиваемым в учебном курсе проблемам; выявление неточностей и некорректного изложения материала в периодической и специальной литературе;
- 5) периодическое ознакомление с последними теоретическими и практическими достижениями в области управления персоналом;
- 6) проведение собственных научных и практических исследований по одной или нескольким актуальным проблемам для *HR*;
- 7) подготовка научных статей для опубликования в периодической печати, выступление на научно-практических конференциях, участие в работе студенческих научных обществ, круглых столах и диспутах по проблемам управления персоналом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брандес М. П. Немецкий язык. Переводческое реферирование: практикум. М.: КДУ, 2008. – 368с.
2. Долгоруков А. Метод case-study как современная технология профессионально-ориентированного обучения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://evolkov.net/case/case.study.html>
3. Методические рекомендации по написанию реферата. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.hse.spb.ru/edu/recommendations/method-referat-2005.phtml>
4. Фролова Н. А. Реферирование и аннотирование текстов по специальности: Учеб. пособие / ВолгГТУ, Волгоград, 2006. - С.5.
5. Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://lesgaft.spb.ru/sites/default/files/u57/metod.rekomendacii_dlya_studentov_21.pdf

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебно-методическому
комплексу _____ С.А. Упоров

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

ФТД.04 ОСНОВЫ ВОЕННОЙ ПОДГОТОВКИ

Направление -

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрены на заседании кафедры

Геологии и защиты в чрезвычайных ситуациях

(название кафедры)

Зав. кафедрой

(подпись)

Стороженко Л.А.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 11.09.2023

(Дата)

Рассмотрены методической комиссией
факультета

Горно-механического

(название факультета)

Председатель

(подпись)

Осипов П. А.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 20.10.2023

(Дата)

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	5
2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ (ТЕМ) ДИСЦИПЛИНЫ	5
3. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ОПРОСУ.....	9
4. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ.....	10
5. ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ.....	28
6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	31

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества специалиста и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знаний должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа – практические занятия;
2. внеаудиторная самостоятельная работа – подготовка к практическим занятиям.

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине «*Основы военной подготовки*» обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к сдаче *зачета*.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «*Основы военной подготовки*» являются:

- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);
- подготовка к практическим занятиям (в т.ч. ответы на вопросы для самопроверки, подготовка к выполнению практических заданий);

- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В современных условиях подготовка граждан Российской Федерации к военной службе является приоритетным направлением государственной политики. Важнейшими вопросами образования на всех уровнях является воспитание любви к Родине, чувства патриотизма, готовности к защите Отечества.

Образовательная дисциплина «Основы военной подготовки» (далее – дисциплина) реализуется исходя из базовых принципов и направлений военной подготовки, дисциплина состоит из основных разделов военной подготовки, тем военно-политической и правовой подготовки.

Основной целью освоения дисциплины является получение знаний, умений и навыков, необходимых для становления обучающихся образовательных организаций высшего образования (далее – вуз) в качестве граждан способных и готовых к выполнению воинского долга и обязанности по защите своей Родины в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Задачами дисциплины «Основы военной подготовки» являются:

- 1) формирование у обучающихся понимания главных положений военной доктрины Российской Федерации, а также основ военного строительства и структуры Вооруженных Сил Российской Федерации (далее - ВС РФ);
- 2) формирование у обучающихся высокого общественного сознания и воинского долга;
- 3) воспитание дисциплинированности, высоких морально-психологических качеств личности гражданина – патриота;
- 4) освоение базовых знаний и формирование ключевых навыков военного дела;
- 5) раскрытие специфики деятельности различных категорий военнослужащих ВС РФ;
- 6) ознакомление с нормативными документами в области обеспечения обороны государства и прохождения военной службы;
- 7) формирование строевой подтянутости, уважительного отношения к воинским ритуалам и традициям, военной форме одежды;
- 8) изучение и принятие правил воинской вежливости;
- 9) овладение знаниями уставных норм и правил поведения военнослужащих.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ (ТЕМ) ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел 1. Общевоинские уставы Вооруженных Сил Российской Федерации

Тема 1. Общевоинские уставы Вооруженных Сил Российской Федерации, их основные требования и содержание.

Структура, требования и основное содержание общевоинских уставов. Права военнослужащих. Общие обязанности военнослужащих. Воинские звания. Единоначалие. Начальники и подчиненные. Старшие и младшие. Приказ и приказание. Порядок отдачи и выполнение приказа. Воинская вежливость и воинская дисциплина военнослужащих.

Тема 2. Внутренний порядок и суточный наряд.

Размещение военнослужащих. Распределение времени и внутренний порядок. Суточный наряд роты, его предназначение, состав.

Дневальный, дежурный по роте. Развод суточного наряда.

Тема 3. Общие положения Устава гарнизонной и караульной службы.

Общие положения Устава гарнизонной и караульной службы.

Обязанности разводящего, часового.

Раздел 2. Строевая подготовка

Тема 4. Строевые приемы и движение без оружия.

Строй и его элементы. Виды строя. Сигналы для управления строем. Команды и порядок их подачи. Обязанности командиров, военнослужащих перед построением и в строю. Строевой расчет. Строевая стойка. Выполнение команд: «Становись», «Равняйсь», «Смирно», «Вольно», «Заправиться». Повороты на месте. Строевой шаг. Движение строевым шагом. Движение строевым шагом в составе подразделения. Повороты в движении. Движение в составе взвода. Управление подразделением в движении.

Раздел 3. Огневая подготовка из стрелкового оружия

Тема 5. Основы, приемы и правила стрельбы из стрелкового оружия.

Требования безопасности при обращении со стрелковым оружием.

Требования безопасности при проведении занятий по огневой подготовке.

Приемы и правила стрельбы из стрелкового оружия.

Тема 6. Назначение, боевые свойства, материальная часть и применение стрелкового оружия, ручных противотанковых гранатометов и ручных гранат.

Назначение, состав, боевые свойства и порядок сборки разборки АК-74 и РПК-74.

Назначение, состав, боевые свойства и порядок сборки разборки пистолета ПМ.

Назначение, состав, боевые свойства РПГ-7.

Назначение, боевые свойства и материальная часть ручных гранат.

Сборка разборка пистолета ПМ и подготовка его к боевому применению.

Сборка разборка АК-74, РПК-74 и подготовка их к боевому применению.

Снаряжение магазинов и подготовка ручных гранат к боевому применению.

Тема 7. Выполнение упражнений учебных стрельб из стрелкового оружия. Требования безопасности при организации и проведении стрельб из стрелкового оружия. Порядок выполнения упражнения учебных стрельб. Меры безопасности при проведении стрельб и проверка усвоения знаний и мер безопасности при обращении со стрелковым оружием. Выполнение норматива №1 курса стрельб из стрелкового оружия.

Раздел 4. Основы тактики общевойсковых подразделений

Тема 8. Вооруженные Силы Российской Федерации их состав и задачи. Тактико-технические характеристики (ТТХ) основных образцов вооружения и техники ВС РФ. Вооруженные Силы Российской Федерации их состав и задачи. Назначение, структура мотострелковых и танковых подразделений сухопутных войск, их задачи в бою. Боевое предназначение входящих в них подразделений. Тактико-технические характеристики основных образцов вооружения и техники ВС РФ.

Тема 9. Основы общевойскового боя.

Сущность современного общевойскового боя, его характеристики и виды. Способы ведения современного общевойскового боя и средства вооруженной борьбы.

Тема 10. Основы инженерного обеспечения.

Цели и основные задачи инженерного обеспечения частей и подразделений. Назначение, классификация инженерных боеприпасов, инженерных заграждений и их характеристики.

Полевые фортификационные сооружения: окоп, траншея, ход сообщения, укрытия, убежища.

Тема 11. Организация воинских частей и подразделений, вооружение, боевая техника вероятного противника.

Организация, вооружение, боевая техника подразделений мпб и тб армии США.

Организация, вооружение, боевая техника подразделений мпб и тб армии Германии.

Раздел 5. Радиационная, химическая и биологическая защита

Тема 12. Ядерное, химическое, биологическое, зажигательное оружие.

Ядерное оружие. Средства их применения. Поражающие факторы ядерного взрыва и их воздействие на организм человека, вооружение, технику и фортификационные сооружения.

Химическое оружие. Отравляющие вещества (ОВ), их назначение, классификация и воздействие на организм человека. Боевые состояния, средства применения, признаки применения ОВ, их стойкость на местности.

Биологическое оружие. Основные виды и поражающее действие.

Средства применения, внешние признаки применения.

Зажигательное оружие. Поражающие действия зажигательного оружия на личный состав, вооружение и военную технику, средства и способы защиты от него.

Тема 13. Радиационная, химическая и биологическая защита.

Цель, задачи и мероприятия РХБ защиты.

Мероприятия специальной обработки:

дегазация, дезактивация, дезинфекция, санитарная обработка.

Цели и порядок проведения частичной и полной специальной обработки.

Технические средства и приборы радиационной, химической и биологической защиты. Средства индивидуальной защиты и порядок их использования.

Подгонка и техническая проверка средств индивидуальной защиты.

Раздел 6. Военная топография

Тема 14. Местность как элемент боевой обстановки.

Измерения и ориентирование на местности без карты, движение по азимутам.

Местность как элемент боевой обстановки.

Способы ориентирования на местности без карты.

Способы измерения расстояний. Движение по азимутам.

Тема 15. Топографические карты и их чтение, подготовка к работе.

Определение координат объектов и целеуказания по карте.

Геометрическая сущность, классификация и назначение топографических карт.

Определение географических и прямоугольных координат объектов по карте.

Целеуказание по карте.

Раздел 7. Основы медицинского обеспечения

Тема 16. Медицинское обеспечение войск (сил), первая медицинская помощь при ранениях, травмах и особых случаях.

Медицинское обеспечение – как вид всестороннего обеспечения войск.

Обязанности и оснащение должностных лиц медицинской службы тактического звена в бою. Общие правила оказания самопомощи и взаимопомощи.

Первая помощь при ранениях и травмах.

Первая помощь при поражении отравляющими веществами, бактериологическими средствами. Содержание мероприятия доврачебной помощи.

Раздел 8. Военно-политическая подготовка

Тема 17. Россия в современном мире. Основные направления социально-экономического, политического и военно-технического развития страны.

Новые тенденции и особенности развития современных международных отношений.

Место и роль России в многополярном мире.

Основные направления социально-экономического, политического и военнотехнического развития Российской Федерации.

Цели, задачи, направления и формы военно-политической работы в подразделении, требования руководящих документов.

Раздел 9. Правовая подготовка

Тема 18. Военная доктрина Российской Федерации. Законодательство Российской Федерации о прохождении военной службы.

Основные положения Военной доктрины Российской Федерации.

Правовая основа воинской обязанности и военной службы.

Понятие военной службы, ее виды и их характеристики.

Обязанности граждан по воинскому учету.

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ОПРОСУ

Раздел 3. Огневая подготовка из стрелкового оружия

1. Каковы виды стрелкового оружия
2. Какие бывают боеприпасы
3. Марки ручных гранат.

Раздел 4. Основы тактики общевойсковых подразделений

1. Из чего состоит организационно-штатная структура общевойсковых подразделений
2. Перечислите Тактико-технические характеристики (ТТХ) основных образцов вооружения и техники ВС РФ
3. Каковы основные факторы, определяющие характер, организацию и способы ведения современного общевойскового боя
4. Перечислите основные инженерно-технических мероприятия.
5. Какие знаете защитные сооружения.
6. Виды заграждений
7. На чем основывается полевое водоснабжение.
8. Каковы емкости РДВ
9. Назначение ТУФ-200
10. Назначение МТК
11. Перечислите ТТХ и ТТД вооружения и боевой техники армии США
12. Перечислите ТТХ и ТТД вооружения и боевой техники армии Германии

Раздел 5. Радиационная, химическая и биологическая защита

1. Общие сведения о ядерном оружии
2. Общие сведения о химическом оружии
3. Общие сведения о биологическом оружии
4. Каковы правила поведения и меры профилактики в условиях радиоактивного заражения
5. Каковы правила поведения и меры профилактики при применении отравляющих веществ

6. Каковы правила поведения и меры профилактики в условиях применения бактериальных средств
7. Какие знаете индивидуальные средства РХБ защиты
8. Каковы мероприятия радиационной, химической и биологической защиты?

Раздел 6. Военная топография

1. Каковы тактические свойства местности, их влияние на действия подразделений в боевой обстановке
2. Назначение, номенклатура и условные знаки топографических карт
3. Способы ориентирования на местности по карте и без карты
4. Что такое номенклатура топографических карт
5. Как задается координаты объекта
6. Уточнение координат по "улитке"

Раздел 8. Военно-политическая подготовка

1. Каковы тенденции и особенности развития современных международных отношений, место и роль России в многополярном мире, основные направления социально-экономического, политического и военно-технического развития страны, основные положения Военной доктрины РФ
2. Правовое положение и порядок прохождения военной службы.

Раздел 9. Правовая подготовка

1. Что значит нормативно-правовой акт
2. Чем определяется порядок прохождения военной службы

4. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Кем утверждаются ОВУ?

- **Вариант ответа**

Государственной Думой

- **Вариант ответа**

Правительством РФ

- **Вариант ответа**

Федеральным собранием РФ

- **Вариант ответа**

Президентом РФ

2. Кем присваивается первое офицерское звание?

- **Вариант ответа**

Мин. Обороны РФ

- **Вариант ответа**

Президентом РФ

- **Вариант ответа**

Правительством РФ

- **Вариант ответа**

Командующим ВВО

- Вариант ответа

Командиром в/ч

3. К какому виду ответственности могут быть привлечены офицеры запаса за уклонение от призыва на действительную в/службу?

- Вариант ответа

моральной

- Вариант ответа

нравственной

- Вариант ответа

административной

- Вариант ответа

уголовной

- Вариант ответа

общественной

4. На чем основываются взаимоотношения между военнослужащими?

- Вариант ответа

на дружбе

- Вариант ответа

на чувстве взаимного уважения

- Вариант ответа

на товариществе

- Вариант ответа

на любви

- Вариант ответа

на вере в силу армии РФ

5. Какое минимальное количество часов отдыха разрешено военнослужащим согласно распорядку дня?

- Вариант ответа

не > 10

- Вариант ответа

не < 8

- Вариант ответа

не > 8

- Вариант ответа

не > 6

- Вариант ответа

не < 6

6. Какое минимальное количество унитазов (очек) должно быть в подразделении (роте)?

- Вариант ответа

не < 15 шт

- Вариант ответа

1 на 30 чел

- Вариант ответа

не > 20 шт

- Вариант ответа

1 на 20 чел

- Вариант ответа

1 на 10-12 чел

7. Сколько должно быть умывальников для умывания в подразделении (роте)?

- Вариант ответа

1 на 5-7 чел

- Вариант ответа

не > 10 шт

- Вариант ответа

не < 10 шт

- Вариант ответа

1 на 10 чел

- Вариант ответа

1 на 8-9 чел

8. Сколько форм одежды для проведения утренней физзарядки?

- Вариант ответа

1

- Вариант ответа

2

- Вариант ответа

3

- Вариант ответа

6

- Вариант ответа

5

9. На чем основывается воинская дисциплина?

- Вариант ответа

на чувстве ответственности за порученное дело

- Вариант ответа

на страхе перед командиром

- Вариант ответа

на осознании каждым в/с воинского долга и личной ответственности за защиту своего Отечества, на его беззаветной преданности своему народу

- Вариант ответа

на взаимном уважении военнослужащих

- **Вариант ответа**

на чувстве преданности Родине

10. Какие поощрения могут применяться к младшим офицерам?

- **Вариант ответа**

внеочередной отпуск до 10 суток

- **Вариант ответа**

увольнение

- **Вариант ответа**

благодарность, награждение грамотой, присвоение внеочередного воинского звания

- **Вариант ответа**

фотографированием у развернутого б/знамени части

- **Вариант ответа**

награждение путевкой в санаторий

11. Какие взыскания могут накладываться на мл. офицеров?

- **Вариант ответа**

до 3 нарядов вне очереди на службу

- **Вариант ответа**

лишение увольнения

- **Вариант ответа**

арест с содержанием на г/вахте

- **Вариант ответа**

отлучение от офицерского собрания

- **Вариант ответа**

выговор, строгий выговор, снятие с должности, понижение в в/звании

12. Каким взысканием может подвергнуться солдат, проходящий военную службу по призыву, за нарушение воинской дисциплины?

- **Вариант ответа**

арест с содержанием на г/вахте до 30 сут

- **Вариант ответа**

арест с содержанием на г/вахте до 20 сут

- **Вариант ответа**

лишение очередного отпуска на родину

- **Вариант ответа**

задержка в выплате денежного довольствия

- **Вариант ответа**

выговор, строгий выговор, лишение очередного увольнения, до 10 суток ареста с содержанием на г/вахте, лишением нагрудного знака отличника, снижением в должности в в/звании на одну ступень, с переводом на низшую должность, до 5 нарядов вне очереди на работу

13. Каким взысканиям может подвергаться КО за нарушения воинской дисциплины?

- **Вариант ответа**

снятие с должности, выговор, строгий выговор

- **Вариант ответа**

лишение в/звания «сержант»

- **Вариант ответа**

лишение очередного отпуска

- **Вариант ответа**

арест на г/вахту до 5 суток

- **Вариант ответа**

лишение денежного довольствия

14. Какие поощрения могут применяться к солдату?

- **Вариант ответа**

до 10 увольнений вне очереди

- **Вариант ответа**

снятие ранее наложенного взыскания, благодарность, награждение грамотой, ценным подарком, присвоение в/звания «ефрейтор», фотографированием у раз-
вернутого б/знамени

- **Вариант ответа**

до 15 суток кратковременного отпуска

- **Вариант ответа**

награждение боевым именованием орудием

- **Вариант ответа**

выдача дополнительного продовольственного пайка

15. Обязанности КВ по отношению к подчиненным при их поощрении?

- **Вариант ответа**

присваивать в/звания «мл. сержант», «сержант», «ст. сержант»

- **Вариант ответа**

отправлять в отпуск на родину на срок до 10 сут

- **Вариант ответа**

объявлять благодарность, снятие ранее наложенного взыскания

- **Вариант ответа**

освободить с г/вахты

- **Вариант ответа**

водить в чайную за свое денежное довольствие

16. Права КВ по отношению к подчиненным при применении дисциплинарных взысканий?

- **Вариант ответа**

арестовывать на срок до 3 суток

- **Вариант ответа**

лишать отпуска с выездом на Родину

- Вариант ответа

объявлять до 6 нарядов вне очереди

- Вариант ответа

объявлять выговор, стр. выговор, лишать очередного увольнения, объявлять до 4 нарядов вне очереди на работу

- Вариант ответа

лишать выдачи печенья и сахара вместо сигарет некурящим в/служащим

17. Чем вооружается наряд по роте?

- Вариант ответа

АК

- Вариант ответа

РПГ

- Вариант ответа

лопатами

- Вариант ответа

вениками

- Вариант ответа

штык-ножами

18. Основные задачи наряда по КПП

- Вариант ответа

открывать ворота КПП

- Вариант ответа

открывать и закрывать ворота КПП

- Вариант ответа

смотреть на проходящих мимо красивых девушек

- Вариант ответа

осуществлять строгий контрольно-пропускной режим в части

- Вариант ответа

пропускать только в/служащих и членов семей на территорию части

19. Основная задача наряда по роте

- Вариант ответа

никуда не сбегать

- Вариант ответа

мыть полы в спальнях помещений

- Вариант ответа

следить за соблюдением распорядка дня, сохранностью КДХО, имущества роты и личных вещей в/служащих

- Вариант ответа

находиться в роте

- Вариант ответа

убирать грязную посуду за л/с роты в столовой

20. Какие бывают парки в ВС РФ?

- **Вариант ответа**

зоопарки

- **Вариант ответа**

развлечений и отдыха

- **Вариант ответа**

постоянные и полевые

- **Вариант ответа**

аквапарки

- **Вариант ответа**

стационарные

21. Кто назначается в наряд по парку?

- **Вариант ответа**

дежурный и дневальный

- **Вариант ответа**

дежурный и водитель-механик дежурного тягача

- **Вариант ответа**

дежурный, дневальные и барабанщик

- **Вариант ответа**

дежурный, дневальные, механик-водитель дежурного тягача

- **Вариант ответа**

механик-водитель дежурного тягача и барабанщик

22. Состав суточного наряда при перевозках войск

- **Вариант ответа**

дежурный по эшелону, помощник, дежурные по вагонам и дневальные

- **Вариант ответа**

дежурные по вагонам, дневальные, барабанщик, фельдшер

- **Вариант ответа**

дежурный, горнист, фельдшер

- **Вариант ответа**

барабанщик и горнист

- **Вариант ответа**

дневальные

23. Сколько времени должно отводиться расписанием дня подготовки лиц суточного наряда

- **Вариант ответа**

не менее 3 ч

- **Вариант ответа**

не более 1 ч

- **Вариант ответа**

не менее 4 ч

- **Вариант ответа**

не более 1 ч

- **Вариант ответа**

не менее 30 мин

24. С какого момента караул переходит в подчинение дежурному по части

- **Вариант ответа**

после того, как помощник дежурного по части дает команду ”равнение на —...” и “смирно” и докладывает дежурному по воинской части

- **Вариант ответа**

при выходе дежурного по части на строевой плац

- **Вариант ответа**

когда дежурный по части выдает пароль

- **Вариант ответа**

при докладе о смене караулов

- **Вариант ответа**

при первом прибытии в караул дежурного по части

25. С чего начинается прием дежурства дежурным по роте

- **Вариант ответа**

со счета кроватей в подразделении

- **Вариант ответа**

со счета тумбочек в подразделении

- **Вариант ответа**

с проверки количества оружия и его качественного состояния

- **Вариант ответа**

с перекура

- **Вариант ответа**

с убытием на улицу

26. Кто инструктирует дежурного по парку

- **Вариант ответа**

командир части

- **Вариант ответа**

начальник штаба в/ч

- **Вариант ответа**

начальник штаба батальона

- **Вариант ответа**

командиром батальона

- **Вариант ответа**

заместителем командира части по вооружению

27. Что не должен принимать дежурный по парку

- **Вариант ответа**

объекты, охраняемые внутренним караулом

- **Вариант ответа**

количество деревьев на территории парка

- **Вариант ответа**

количество автомобильной техники в/ч

- **Вариант ответа**

состояние деж. тягача

- **Вариант ответа**

количество и состояние оттисков печатей на хранилищах с техникой

28. Где должно храниться оружие в подразделении

- **Вариант ответа**

под кроватями

- **Вариант ответа**

под подушками

- **Вариант ответа**

за тумбочками

- **Вариант ответа**

в каптерке

- **Вариант ответа**

в комнате для хранения оружия, в пирамидах

29. У кого должны храниться ключи от комнаты для хранения оружия

- **Вариант ответа**

у дежурного по роте

- **Вариант ответа**

у командира взвода

- **Вариант ответа**

у командира батальона

- **Вариант ответа**

у командира роты

- **Вариант ответа**

у дежурного по части

30. Кто дает разрешение на вскрытие комнаты для хранения оружия

- **Вариант ответа**

старшина роты

- **Вариант ответа**

командир взвода

- **Вариант ответа**

заместитель командира роты по воспитательной работе

- **Вариант ответа**

командир роты

- **Вариант ответа**

командир части

31. Чьими печатями должна опечатываться комната для хранения оружия

- **Вариант ответа**

командира части и командира роты

- **Вариант ответа**

командира роты и дежурного по роте

- **Вариант ответа**

дежурного по роте и дежурного по части

- **Вариант ответа**

старшины роты и командира роты

- **Вариант ответа**

командира роты и дежурного по части

Тесты по медицинской подготовке:

1. Объем первой медицинской помощи с динамическими (механическими) факторами поражения:

- **Вариант ответа**

временная остановка кровотечения, искусственное дыхание

- **Вариант ответа**

временная остановка наружного кровотечения, устранение асфиксии, искусственное дыхание, непрямой массаж сердца, введение обезболивающих средств, наложение асептических повязок, транспортная иммобилизация

- **Вариант ответа**

простейшие противошоковые мероприятия, временная остановка кровотечения, эвакуация

- **Вариант ответа**

закрытие ран повязками, иммобилизация конечностей табельными и подручными средствами

2. Методы временной остановки наружного кровотечения на месте поражения:

- **Вариант ответа**

наложение асептической повязки, пальцевое прижатие кровотокающего сосуда, давящая повязка, наложение жгута

- **Вариант ответа**

наложение кровоостанавливающего жгута, давящая повязка, тугая тампонада раны, форсированное сгибание конечности с последующей фиксацией, пальцевое прижатие кровотокающего сосуда

- **Вариант ответа**

давящая повязка, наложение жгута, наложение зажима на кровотокающий сосуд, форсированное сгибание конечности

- **Вариант ответа**

наложение зажима на кровоточащий сосуд, наложение асептической повязки

3. Объем первой медицинской помощи при проникающем ранении живота:

- **Вариант ответа**

при эвентрации вправление выпавших органов в брюшную полость, наложение асептической повязки на рану, эвакуация в положении лежа

- **Вариант ответа**

введение анальгетиков, теплое питье, асептическая повязка, эвакуация на носилках

- **Вариант ответа**

обезболивание, наложение асептической повязки, вынос из очага на носилках, эвакуация в первую очередь

- **Вариант ответа**

введение аналептиков, теплое питье, асептическая повязка, эвакуация на носилках

4. Первая медицинская помощь при повреждении таза и тазовых органов:

- **Вариант ответа**

инъекция спазмолитиков, наложение асептических повязок, щадящая эвакуация на носилках на спине, при подозрении на перелом таза - в положении лягушки

- **Вариант ответа**

инъекция промедола, наложение асептических повязок на раны, дача противобактериальных препаратов, эвакуация в положении лягушки

- **Вариант ответа**

инъекция морфина, наложение асептических повязок на раны, при кровотечении прием гомеостатических средств, эвакуация на носилках спиной вниз

- **Вариант ответа**

инъекция морфина, наложение асептических повязок на раны, при кровотечении прием гомеостатических средств, эвакуация на носилках лежа

5. Максимально допустимая длительность клинической смерти:

- **Вариант ответа**

1-2 минуты

- **Вариант ответа**

5-7 минут

- **Вариант ответа**

3-5 минут

- **Вариант ответа**

10-15 минут

6. Порядок реанимационных мероприятий одним человеком:

- **Вариант ответа**

2 вдувания + 30 компрессий

- **Вариант ответа**

1 вдувание + 5 компрессий

- Вариант ответа

3 вдувания + 10 компрессий

- Вариант ответа

5 вдуваний + 20 компрессий

7. Положение рук реаниматора при проведении непрямого массажа сердца:

- Вариант ответа

лучезапястные и локтевые суставы максимально разогнуты

- Вариант ответа

лучезапястные и локтевые суставы максимально согнуты

- Вариант ответа

локтевые суставы согнуты, лучезапястные – разогнуты

- Вариант ответа

локтевые суставы разогнуты, лучезапястные – согнуты

8. Темп непрямого массажа сердца должен составлять в минуту:

- Вариант ответа

5 сжатий

- Вариант ответа

12 сжатий

- Вариант ответа

20 сжатий

- Вариант ответа

100-110 сжатий

9. Реанимация это:

- Вариант ответа

раздел клинической медицины, изучающий терминальные состояния

- Вариант ответа

отделение многопрофильной больницы

- Вариант ответа

практические действия, направленные на восстановление жизнедеятельности

- Вариант ответа

раздел клинической медицины, изучающий термические состояния

10. Реанимация показана:

- Вариант ответа

в каждом случае смерти больного

- Вариант ответа

только при внезапной смерти молодых больных

- Вариант ответа

при внезапно развившихся терминальных состояниях

- Вариант ответа

только при внезапной смерти детей

11. Максимальная продолжительность клинической смерти в обычных условиях составляет:

- Вариант ответа

10-15 мин

- Вариант ответа

5-6 мин

- Вариант ответа

2-3 мин

12. Необходимыми условиями при проведении искусственной вентиляции легких являются:

- Вариант ответа

применение воздуховода

- Вариант ответа

достаточный объем вдуваемого воздуха

- Вариант ответа

валик под лопатками больного

- Вариант ответа

применение воздуховода

13. Первая медицинская помощь при сдавлении конечностей:

- Вариант ответа

новокаиновая блокада, транспортная иммобилизация, введение обезболивающих, сердечных, антигистаминных и противобактериальных средств, прием внутрь соды, ингаляции кислорода

- Вариант ответа

введение промедола, прием внутрь противобактериального средства, тугое бинтование придавленных конечностей от периферии к центру, охлаждение конечности, транспортная иммобилизация

- Вариант ответа

прием внутрь соды и утоление жажды, инъекция атропина, морфия, кофеина и димедрола

- Вариант ответа

иммобилизация транспортными шинами, быстрая эвакуация

личии у них травм позвоночника транспортируются в положении:

- Вариант ответа

на боку на обычных носилках

- Вариант ответа

на животе на обычных носилках

- Вариант ответа

на боку на щите

- Вариант ответа

на спине на щите

14. Шок – это:

- Вариант ответа

острая сердечная недостаточность

- Вариант ответа

острая сердечно-сосудистая недостаточность

- Вариант ответа

острое нарушение периферического кровообращения

- Вариант ответа

острая легочно-сердечная недостаточность

15. При болевом шоке первой развивается:

- Вариант ответа

торпидная фаза шока

- Вариант ответа

эректильная фаза шока

- Вариант ответа

фаза сопротивления

- Вариант ответа

фаза истощения

16. Первое действие при оказании ПМП при синдроме длительного сдавления:

- Вариант ответа

обезболить, наложить жгут

- Вариант ответа

освободить конечность

- Вариант ответа

наложить асептическую повязку

- Вариант ответа

транспортная иммобилизация

17. При сдавливании конечности в течение 4-7 часов возникает:

- Вариант ответа

легкая степень СДР

- Вариант ответа

тяжелая степень СДР

- Вариант ответа

крайне тяжелая степень СДР

- Вариант ответа

средняя степень СДР

18. Какая повязка накладывается при растяжении голеностопных связок:

- Вариант ответа

черепашья

- Вариант ответа

восьмиобразная

- Вариант ответа

уздечка

- Вариант ответа

Колосовидная

19. Какая повязка накладывается при ранениях волосистой части головы:

- Вариант ответа

Восьмиобразная

- Вариант ответа

Т-образная

- Вариант ответа

"Чепец"

- Вариант ответа

Уздечка

20. Какая повязка накладывается при обширных повреждениях груди:

- Вариант ответа

окклюзионная

- Вариант ответа

спиральная

- Вариант ответа

восьмиобразная

- Вариант ответа

Колосовидная

21. При повреждении плеча показана повязка:

- Вариант ответа

колосовидная

- Вариант ответа

восьмиобразная

- Вариант ответа

черепашья

- Вариант ответа

спиральная

22. При обширных отморожениях конечностей используют:

- Вариант ответа

рыцарскую перчатку

- Вариант ответа

варежку

- Вариант ответа

термоизолирующую повязку

- Вариант ответа

асептическую

23. Смешанное кровотечение:

- Вариант ответа

при одновременном ранении артерий и вен

- Вариант ответа

при ранениях вен и капилляров

- Вариант ответа

при ранении вен

- Вариант ответа

при ранении артерий

24. Первая медицинская помощь при ранении наружной сонной артерии:

- Вариант ответа

пальцевое ее прижатие

- Вариант ответа

прошивание раны

- Вариант ответа

наложение давящей повязки

- Вариант ответа

наложение стерильной повязки

25. Первая медицинская помощь при закрытых переломах костей конечностей:

- Вариант ответа

наложение транспортной шины

- Вариант ответа

транспортировка без транспортной иммобилизации

- Вариант ответа

транспортировка пешком

- Вариант ответа

транспортировка в «позе лягушки»

26. Мероприятия первой медицинской помощи, проводимые пострадавшему с ожогами:

- Вариант ответа

промывание ожоговой поверхности

- Вариант ответа

обезболивание

- Вариант ответа

инфузионная терапия

- Вариант ответа

наложение клеоловой повязки

27. Общие принципы неотложной помощи при отравлениях:

- **Вариант ответа**

вызывание рвоты различными методами, зондовое промывание желудка, стимуляция мочеотделения, удаление неабсорбированных ядов,

- **Вариант ответа**

прекращение дальнейшего поступления яда в организм, применение антидота, восстановление и поддержание нарушенных функций организма, устранение отдельных симптомов интоксикации

- **Вариант ответа**

удаление неабсорбированных токсических веществ, форсированный диурез, гемодиализ, слабительные средства, гемоперфузия, полная санитарная обработка, применение антидота

- **Вариант ответа**

антибиотикотерапия, применение противосудорожных средств

28. Территория, на которой произошел выброс ядовитого вещества в окружающую среду и продолжается его испарение в атмосферу, называется:

- **Вариант ответа**

очагом экологического заражения

- **Вариант ответа**

очагом химического заражения

- **Вариант ответа**

зоной химического заражения

- **Вариант ответа**

зоной экологического заражения

29. Территория, подвергнутая воздействию паров ядовитого вещества, называется:

- **Вариант ответа**

очагом химического заражения

- **Вариант ответа**

зоной экологического заражения

- **Вариант ответа**

зоной химического заражения

- **Вариант ответа**

очагом экологического заражения

30. Промывание желудка при отравлениях кислотами и щелочами производится:

- **Вариант ответа**

после обезболивания рефлекторным методом

- **Вариант ответа**

противопоказано

- Вариант ответа

после обезболивания зондовым методом

- Вариант ответа

после обезболивания физиологическим методом

31. Промывание желудка при отравлениях кислотами и щелочами производится:

- Вариант ответа

нейтрализующими растворами

- Вариант ответа

холодной водой

- Вариант ответа

водой комнатной температуры

- Вариант ответа

теплой водой

32. Наиболее эффективно удаляется яд из желудка:

- Вариант ответа

холодной водой

- Вариант ответа

горячей водой

- Вариант ответа

при промывании рефлекторным методом

- Вариант ответа

при промывании зондовым методом

33. При наличии в атмосфере паров хлора необходимо перемещаться:

- Вариант ответа

в верхние этажи зданий

- Вариант ответа

на улицу

- Вариант ответа

в нижние этажи и подвалы

- Вариант ответа

на крышу

34. При наличии в атмосфере паров хлора дыхательные пути нужно защитить:

- Вариант ответа

ватно-марлевой повязкой, смоченной в растворе пищевой соды

- Вариант ответа

ватно-марлевой повязкой, смоченной в растворе уксусной кислоты

- Вариант ответа

ватно-марлевой повязкой, смоченной кипяченой водой

- Вариант ответа

сухой ватно-марлевой повязкой

35. Пары хлора и аммиака вызывают:

- **Вариант ответа**

возбуждение и эйфорию

- **Вариант ответа**

раздражение верхних дыхательных путей

- **Вариант ответа**

слезотечение

- **Вариант ответа**

Ларингоспазм

36. Способы защиты пищевых продуктов от заражения, загрязнения* при применении оружия массового поражения:

- **Вариант ответа**

герметизация складов и других хранилищ пищевых продуктов, дезинфекция

- **Вариант ответа**

автоклавирование посуды

- **Вариант ответа**

расфасовка пищевых продуктов в герметическую тару, строительство объектов пищевого надзора за городом, герметизация складов и других хранилищ пищевых продуктов

- **Вариант ответа**

ассредоточение пищевых продуктов и строительство объектов пищевого надзора за городом, кипячение

37. Средства обеззараживания воды в очагах массового поражения:

- **Вариант ответа**

гиперхлорирование (с последующим дехлорированием), кипячение, фильтрация, отстаивание, применение перекиси водорода, пергидроля, пантоцида

- **Вариант ответа**

хлорирование, фильтрация, применение перекиси водорода

- **Вариант ответа**

хлорирование, использование пергидроля, пантоцида

- **Вариант ответа**

кипячение, фильтрация, применение перекиси водорода

5. ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к зачету по дисциплине «Основы военной подготовки» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить ин-

формацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «*Основы военной подготовки*».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во-первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАЧЕТУ

1. Каковы виды стрелкового оружия?
2. Какие бывают боеприпасы?
3. Назовите марки ручных гранат.
4. Из чего состоит организационно-штатная структура общевойсковых подразделений?
5. Перечислите Тактико-технические характеристики (ТТХ) основных образцов вооружения и техники ВС РФ.
6. Каковы основные факторы, определяющие характер, организацию и способы ведения современного общевойскового боя?
7. Перечислите основные инженерно-технических мероприятия.
8. Какие существуют защитные сооружения?
9. Какие бывают виды заграждений?
10. На чем основывается полевое водоснабжение?
11. Каковы емкости РДВ?

12. Назовите назначение ТУФ-200.
13. Назовите назначение МТК.
14. Перечислите ТТХ и ТТД вооружения и боевой техники армии США.
15. Перечислите ТТХ и ТТД вооружения и боевой техники армии Германии.
16. Перечислите общие сведения о ядерном оружии.
17. Перечислите общие сведения о химическом оружии
18. Перечислите общие сведения о биологическом оружии
19. Каковы правила поведения и меры профилактики в условиях радиоактивного заражения?
20. Каковы правила поведения и меры профилактики при применении отравляющих веществ?
21. Каковы правила поведения и меры профилактики в условиях применения бактериальных средств?
22. Какие существуют индивидуальные средства РХБ защиты?
23. Каковы мероприятия радиационной, химической и биологической защиты?
24. Каковы тактические свойства местности, их влияние на действия подразделений в боевой обстановке?
25. Опишите назначение, номенклатура и условные знаки топографических карт.
26. Назовите способы ориентирования на местности по карте и без карты.
27. Что такое номенклатура топографических карт?
28. Как задаются координаты объекта?
29. Что такое уточнение координат по "улитке"?
30. Каковы тенденции и особенности развития современных международных отношений?
31. Назовите место и роль России в многополярном мире.
32. Перечислите основные направления социально-экономического развития России.
33. Перечислите основные направления политического развития России.
34. Перечислите основные направления военно-технического развития России.
35. Какие существуют основные положения Военной доктрины РФ?
36. Назовите правовое положение и порядок прохождения военной службы.
37. Что значит нормативно-правовой акт?
38. Чем определяется порядок прохождения военной службы?
39. Назовите основные задачи укрепления безопасности страны.
40. Чем актуальны положения военной доктрины?
41. Перечислите основные тенденции развития военно-политической обстановки.
42. Какие существуют основные требования и категории военной доктрины России?
43. Как взаимосвязаны военная безопасность и жизненно важные интересы?

44. Напишите методологическое значение определения жизненно важных интересов.
45. Перечислите военно-политические основы военной доктрины РФ.
46. Перечислите военно-стратегические основы военной доктрины РФ.
47. Перечислите военно-экономические основы военной доктрины РФ.
48. Перечислите военно-технические основы военной доктрины РФ.
49. Назовите роль и место вооруженных сил в демократическом государстве.
50. Перечислите особенности гражданского контроля за вооруженными силами в демократических государствах.
51. Какие вы знаете особенности дисциплинарной практики?
52. Что такое «статус военнослужащего»?

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование	Кол-во экз.
1	Общевойские уставы Вооруженных сил Российской Федерации : курс лекций / составители В. А. Борисов, И. Е. Акулов, В. К. Фоменко. — Томск : Томский политехнический университет, 2019. — 87 с. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/106173.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
2	Основы огневой подготовки : учебное пособие / А. В. Рыжов, В. М. Коняев, С. В. Пожидаев, Д. В. Горденко. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 110 с. — ISBN 978-5-4497-1170-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/109245.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI: https://doi.org/10.23682/109245	Эл. ресурс
3	Огневая подготовка : учебное пособие / В. В. Белевцев, Д. В. Горденко, Д. Н. Резеньков, Е. В. Кособлик. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 132 с. — ISBN 978-5-4497-1289-9. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/109244.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI: https://doi.org/10.23682/109244	Эл. ресурс
4	Общевойская подготовка. В 2 частях. Ч.1 : учебное пособие / А. Г. Борисов, К. В. Анистратенко, Е. Ю. Лубашев [и др.] ; под редакцией А. Г. Борисова. — Ростов-на-Дону, Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2022. — 414 с. — ISBN 978-5-9275-4192-8 (ч.1), 978-5-9275-4191-1. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/127091.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. -	Эл. ресурс
5	Общевойская и тактическая подготовка : учебное пособие / С. А. Чеховский, В. Н. Алёшичев, А. С. Евтехов, С. К. Бушанский. — Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, ЭБС АСВ, 2021. — 280 с. — ISBN 978-5-7433-3472-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/124344.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI:	Эл. ресурс

	https://doi.org/10.23682/124344	
6	Баранов, А. Р. Военная топография в служебно-боевой деятельности оперативных подразделений : учебник для курсантов и слушателей военных учебных заведений / А. Р. Баранов, Ю. Г. Маслак, В. И. Ягодинцев. — Москва : Академический проект, 2020. — 159 с. — ISBN 978-5-8291-2944-6. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/110047.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.	Эл. ресурс
7	Оказание первой доврачебной помощи в образовательных организациях : учебно-методическое пособие / Ю. В. Азизова, С. К. Касимова, А. В. Трясунов [и др.]. — Астрахань : Астраханский государственный университет, Издательский дом «Астраханский университет», 2020. — 70 с. — ISBN 978-5-9926-1188-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/108843.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
8	Маслова, Л. Ф. Первая помощь пострадавшим : учебное пособие / Л. Ф. Маслова. — Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, 2020. — 40 с. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/121690.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
9	Кутепов, В. А. Тактическая подготовка. Радиационная, химическая и биологическая защита : учебное пособие / В. А. Кутепов, А. Б. Адемченко, С. В. Ковалев. — Омск : Омский государственный технический университет, 2017. — 226 с. — ISBN 978-5-8149-2523-7. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/78509.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
10	Техническое обеспечение средств радиационной, химической и биологической защиты : учебное пособие / А. В. Шаламов, С. Р. Ахметов, Н. Р. Миннуллин [и др.]. — Казань : Издательство КНИТУ, 2022. — 256 с. — ISBN 978-5-7882-3135-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/129262.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
11	Боевой устав по подготовке и ведению общевойскового боя. Часть 2. Батальон, рота. — Саратов : Вузовское образование, 2023. — 286 с. — ISBN 978-5-4487-0918-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/127500.html (дата обращения: 23.01.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
12	Боевой устав по подготовке и ведению общевойскового боя. Часть 3. Взвод, отделение, танк. — Саратов : Вузовское образование, 2023. — 224 с. — ISBN 978-5-4487-0917-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/127501.html (дата обращения: 23.01.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
13	Баранов, А. Р. Тактико-специальная подготовка войскового разведчика внутренних войск : учебно-практическое пособие / А. Р. Баранов, Ю. Г. Маслак ; под редакцией Ю. Г. Маслак. — Москва : Академический Проект, Трикста, 2015. — 368 с. — ISBN 978-5-8291-1490-9. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/36874.html (дата обращения: 16.05.2022). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс