

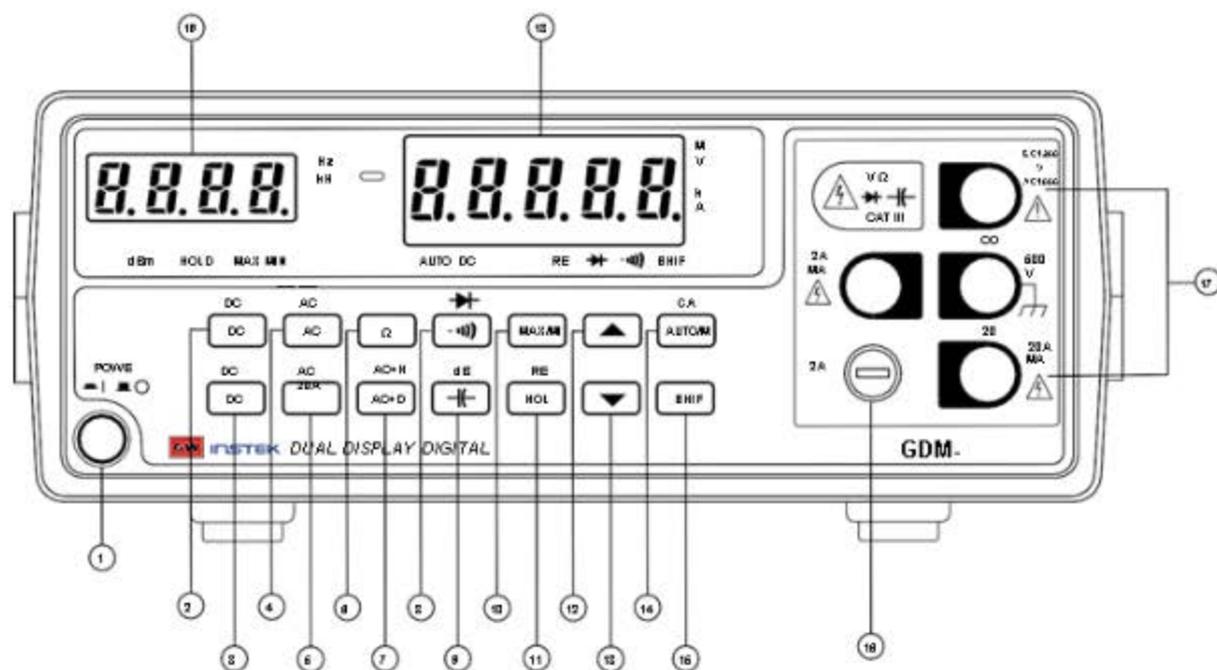
СОДЕРЖАНИЕ

1. Изучение контрольно-измерительных приборов	5
2. Наблюдение и измерение параметров периодических сигналов.....	39
3. Определение емкости конденсатора	43
4. Определение электродвижущей силы источника тока	52
5. Определение сопротивлений проводников.....	60
6. Снятие кривой намагничивания и петли гистерезиса.....	68
7. Определение индуктивности катушки.....	83
Литература.....	91

Вольтметры имеют две цифровых шкалы, позволяющих одновременно отображать:

- уровень переменного напряжения и частоту;
- уровень напряжения (постоянное и переменное) в абсолютных (В) и относительных (дБм) единицах.

Органы управления и индикации



Передняя панель GDM-8245

Назначение органов управления и индикации передней панели GDM-8245:

№	Обозначение	Назначение
1	POWER	Включение/выключение питания
2	DCV / DCmV	1. [DCV] выбор режима измерения постоянного напряжения (> 500 мВ) 2. [Shift]+[DCmV] выбор режима измерения постоянного напряжения (≤ 500 мВ)
3	DCA / DC 20A	1. [DCA] выбор режима измерения постоянного тока (≤ 2 А) 2. [Shift]+[DC 20 A] выбор режима измерения постоянного тока (> 2 А)

№	Обозначение	Назначение
4	ACV / ACmV	1. [ACV] выбор режима измерения переменного напряжения (> 500 мВ) 2. [Shift]+[ACmV] выбор режима измерения переменного напряжения (≤ 500 мВ)
5	ACA / AC 20A	1. [ACA] выбор режима измерения переменного тока (≤ 2 А) 2. [Shift]+[AC 20 A] выбор режима измерения переменного тока (> 2 А)
6	Ω	Выбор режима измерения сопротивления
7	AC+DC / AC+Hz	1. [AC+DC] выбор режима измерения переменного сигнала со смещением 2. [Shift]+[AC+Hz] выбор режима измерения переменного напряжения (тока) и частоты
8))) /	1. [«)»] выбор режима прозвона цепи 2. [Shift]+[«)»] выбор режима испытания р-п переходов
9	/ dBm	1. Выбор режима измерения емкости 2. [Shift]+[dBm] выбор режима измерения относительного напряжения
10	MAX / MIN	Включение режима регистрации максимальных/минимальных значений
11	HOLD / REL	1. [HOLD] включение режима удержания показаний 2. [Shift]+[REL] включение режима Δ -измерений
12	▲	Выбор большего предела измерения в ручном режиме
13	▼	Выбор меньшего предела измерения в ручном режиме
14	AUTO / MAN	Переключение автоматический/ручной выбор предела измерения
15	SHIFT	Кнопка-префикс
16	2 A 250V	Держатель предохранителя измерительной цепи по току
17	COM, 20 A, 2 A, V- Ω	COM- V- Ω — измерение напряжения, сопротивления, емкости COM-2 A (20 A) — измерение тока до 2 А (> 2 А)
18		Основная цифровая шкала
19		Дополнительная цифровая шкала

Кнопки двойного назначения:

Часть кнопок на лицевой панели прибора имеют двойное назначение — основное и дополнительное. Основной режим указан непосредственно на кнопке, дополнительный — над кнопкой и выделен синим цветом.

Основной режим включается нажатием соответствующей кнопки. Для включения дополнительного режима необходимо сначала нажать кнопку префикса [SHIFT], при этом включается индикатор SHIFT, а затем — соответствующую кнопку.

Органы индикации:

В случае перегрузки по измерительному входу на основной шкале отображается «-OL-».

При измерении частоты в режиме измерения переменного напряжения/тока, когда входной уровень меньше порога чувствительности, на дополнительной шкале отображается «----». Когда частота входного сигнала превысит 51 кГц — на основной шкале отображается «----».

Измерение напряжения:

Режимы измерения: DCV, ACV, DCmV, ACmV.

1. Включить соответствующий режим измерения.
2. Используя клавишу [AUTO/MAN], установить автоматический или ручной режим выбора предела измерения.
3. Подсоединить измерительные провода к входам V (красный) и COM (черный).
4. Подключить измерительные щупы параллельно схеме измерения и считать результат с дисплея. ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ. Если после измерения напряжения $> 1\ 000\ В$ сразу измерять напряжение $< 100\ мкВ$, то возможно появление дополнительных погрешностей. Для повышения точности измерений в этом случае необходимо выдержать паузу в течении 1 минуты.

Измерение тока:

Режимы измерения: DCA, ACA, DC20 A, AC20 A.

1. Включить соответствующий режим измерения.
2. Используя клавишу [AUTO/MAN], установить автоматический или ручной режим выбора предела измерения.
3. Подсоединить измерительные провода к входам 2 A или 20 A (красный) и СОМ (черный).
4. Подключить измерительные щупы последовательно схеме измерения и считать результат с дисплея.

Измерение сопротивления, емкости, прозвонка целостности цепи:

Режимы измерения: Ω , μ).

1. Включить соответствующий режим измерения.
2. Используя клавишу [AUTO/MAN], установить автоматический или ручной режим выбора предела измерения.
3. Подсоединить измерительные провода к входам Ω , μ (красный) и СОМ (черный).
4. Подключить измерительные щупы параллельно схеме измерения и считать результат с дисплея.

Измерение емкости:

Режимы измерения: μ

1. Включить соответствующий режим измерения.
2. Используя клавишу [AUTO/MAN], установить автоматический или ручной режим выбора предела измерения. Примечание: для автоматического выбора пределов измерений емкости выберите верхний предел измерений, подключите конденсатор и нажмите AUTO.
3. Подсоединить измерительные провода к входам Ω , μ (красный) и СОМ (черный).
4. Подключить измерительные щупы параллельно схеме измерения и считать результат с дисплея.

Испытание р-п перехода:

Режим измерения: ▶+

1. Включить режим измерения.
2. Подсоединить измерительные провода к входам ▶+ (красный) и СОМ (черный).
3. Подключить измерительные щупы к р-п переходу: красный к «+», черный к «-». Считать результат с дисплея.

Измерение частоты:

Режим измерения: АС+Hz.

Данный режим доступен только при измерениях переменного напряжения и тока (АСV, АСmV, АСА, АС20 А).

Одновременное использование режимов АС+Hz и dBm невозможно.

Для включения режима нажать клавиши [SHIFT]+[АС+Hz]. При этом на дополнительной шкале будет отображаться частота входного сигнала, если уровень сигнала выше порога чувствительности.

Измерение частоты обеспечивается при регистрации min/max значений, Δ-измерениях, удержании показаний. Выключение режима — повторным нажатием клавиш [SHIFT]+[АС+Hz].

Измерение полного сигнала:

Режим измерения: АС+DC.

Данный режим доступен только при измерениях напряжения и тока (DCV, АСV, DCmV, АСmV, DCA, АСА, DC20А, АС20 А).

Для включения режима нажать клавишу [АС+DC]. При этом на основной шкале будет отображаться точное среднеквадратичное значение уровня входного сигнала, содержащего постоянную и переменную составляющие (Total RMS).

В данном режиме скорость измерения ниже.

Для выключения режима — нажать клавишу любого режима измерения.

Измерение max/min значений:

Режим измерения: MAX/MIN.

Режим обеспечивает регистрацию и удержание наибольших или наименьших значений с момента активизации данного режима.

При нажатии клавиши [MAX/MIN] включается режим MAX, при котором показания основной шкалы будут изменяться только при увеличении входного сигнала. При нажатии клавиши [MAX/MIN] в режиме MAX включается режим MIN, при котором показания основной шкалы будут изменяться только при уменьшении входного сигнала.

Для выключения режима — нажать клавишу [MAX/MIN] в режиме MIN.

ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ АКПП-3430/1



Генератор сигналов специальной формы
АКПП-3430/1

Руководство по эксплуатации

Назначение:

Генератор сигналов предназначен для воспроизведения периодических сигналов наиболее распространенных форм в диапазоне частот от 1 мкГц до 30 МГц. Обеспечивает формирование сигналов си-

нусоидальной и специальной формы с возможностью генерации импульсного сигнала, а также сигналов произвольной формы.

Генератор является устройством прямого цифрового синтеза (DDS) и позволяет воспроизводить любой сигнал, описанный и занесенный в память прибора.

Генератор имеет возможность модуляции параметров выходного сигнала, обеспечивает качание (сви핑ирование по частоте) по логарифмическому и линейному законам в разных направлениях, с настраиваемым временем. Прибор имеет дополнительный вход для подачи внешнего модулирующего сигнала, выход синхросигнала (TTL). Генераторы позволяют задавать напряжение смещения выходного сигнала.

Использование прямого цифрового синтеза и максимальное разрешение по частоте 1 мкГц, делает генераторы серии **АКИП-3430** универсальным решением, способным удовлетворить требования к измерительной аппаратуре в настоящее время и на перспективу.

Прибор обеспечивает возможность формирования сигналов произвольной формы с помощью программного обеспечения по интерфейсу USB.

Основные функциональные возможности прибора:

1. Технология DDS — прямой цифровой синтез.
2. Цветной графический ЖК дисплей с диагональю 9,14 см и разрешением 480×272 .
3. Максимальные диапазоны частот (в зависимости от модели):
Синусоидальная форма: от 1 мкГц до 60 МГц
Прямоугольная форма: от 1 мкГц до 20 МГц
Треугольная/Пилообразная форма: от 1 мкГц до 2 МГц
Импульсная форма: от 1 мкГц до 20 МГц.
Белый шум: 20 МГц
Произвольная форма: от 1 мкГц до 10 МГц
4. Пять стандартных форм сигналов: синусоидальная, прямоугольная, треугольная/пилообразная, импульсная, белый шум.
5. Создание собственных произвольных форм сигнала.

6. Режимы модуляции: АМ, ЧМ, ФМ, АМн, ЧМн, ФМн (BPSK, QPSK), ШИМ, СУМ (наложение сигналов), а также пакетный режим/Burst (с выбором формы сигнала заполнения и числа импульсов в пакете).

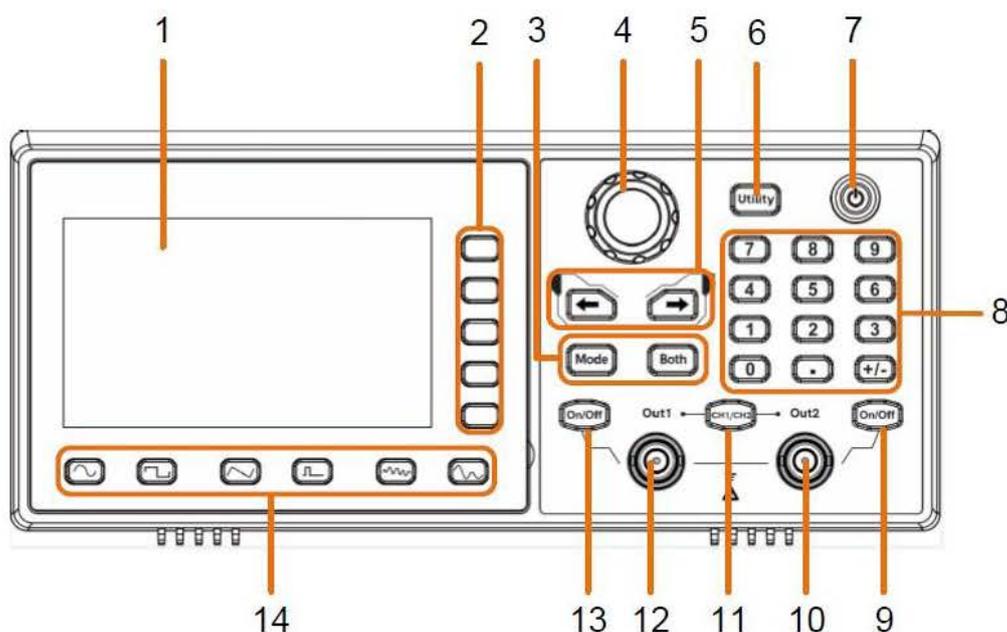
7. Режим свипирования: линейное/логарифмическое качание по частоте (ГКЧ) с возможностью установки начальной и конечной частоты, времени и шага качания.

8. Встроенный частотомер до 100 МГц (7 разрядов, вход на задней панели).

9. Воспроизведение сигналов произвольных форм длиной до 100 кБ.

10. Интерфейс USB для дистанционного управления.

Описание органов управления передней и задней панели:

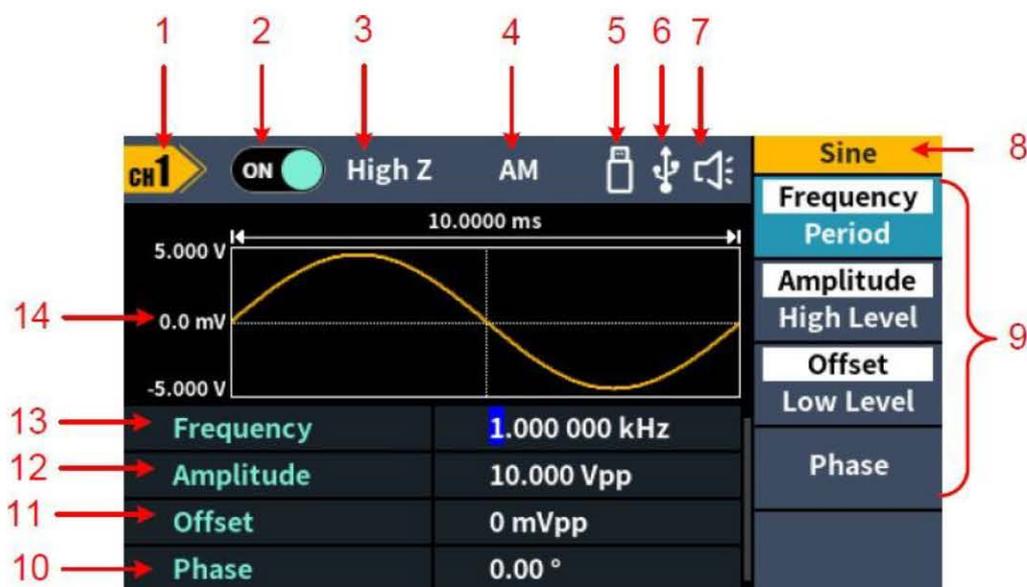


Внешний вид передней панели

1. ЖК-дисплей.
2. Кнопки управления меню.
3. Кнопки режимов работы:
 - кнопка включения режим модуляции (Mode);
 - кнопка переключения режима настроек каналов (Both).
4. Ручка регулятора.

5. Курсорные кнопки.
6. Кнопка **Utility** — вход в меню системных настроек.
7. Кнопка включения питания.
8. Блок цифровых кнопок
9. Кнопка **On/Off** — кнопка включения или выключения выхода канала 2. Когда выход включен, горит подсветка кнопки.
10. Выходной разъем канала 2.
11. Кнопка **CH1/CH2** — переключение каналов для выполнения настроек.
12. Выходной разъем канала 1.
13. Кнопка **On/Off** — кнопка включения или выключения выхода канала 1. Когда выход включен, горит подсветка кнопки.
14. Блок кнопок выбора форм сигналов:
 - синусоидальная форма 
 - прямоугольная форма 
 - треугольная форма 
 - импульсная форма 
 - шум 
 - сигналы произвольной формы 

Описание ЖК-дисплея:



1. Отображение имени активного канала для выполнения настроек.
2. Отображение статуса канала: Оп/Вкл/Выкл/Off.
3. Отображение текущей настройки сопротивления выхода.
4. Отображение текущего режима работы генератора.
5. Данный индикатор отображается при подключении к прибору внешнего USB Flash диска.
6. Данный индикатор отображается при подключении прибора к USB-хосту через интерфейс USB DEVICE.
7. Индикатор звукового сопровождения.
8. Заголовок меню.
9. Меню выбора формы сигнала или выполнения настроек, в зависимости от выбранного режима работы.
10. Установка начальной фазы.
11. Установка смещения или нижнего уровня, в зависимости от настроек.
12. Установка уровня сигнала или верхнего уровня, в зависимости от настроек.
13. Установка частоты или периода, в зависимости от настроек.
14. Графическое отображение формы сигнала.

Описание клавиатуры:

Выбор канала — служит для выбора настраиваемого канала, нажатие кнопки переключает активный канал для настройки.

Блок кнопок ввода и ручка регулятора для ввода значений используются: блок цифровой клавиатуры (с десятичным разделителем), курсорные кнопки и ручка регулятора.

Цифровая клавиатура — используется для непосредственного ввода цифровых значений.

Курсорные кнопки — используются для перемещения курсора (влево/вправо).

Ручка регулятора — служит для оперативного изменения выбранного параметра, вращение ручки регулятора производит изменение значений подсвеченного курсора.

Функциональные кнопки.

Блок функциональных кнопок:

- 1) **UTILITY** — переход в меню утилит (настройки генератора);
- 2) **MODE** — переход в меню режима модулированных колебаний;
- 3) **BOTH** — кнопка переключения режима настроек каналов (два канала или один канал).

Кнопки управления меню (F1~F5) сверху вниз F1, F2, F3, F4, F5 служат для управления меню настроек (меню настроек расположено в правой части экрана). Назначение кнопок зависит от выбранного режима.

Кнопки выбора формы сигнала служат для выбора основных форм сигналов и перехода в меню произвольной формы.

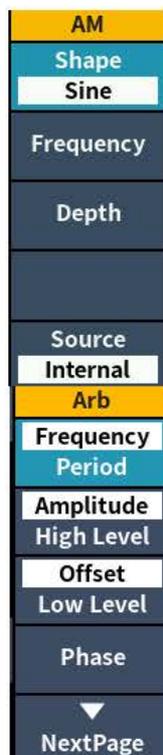
Кнопки включения/выключения выхода служат для включения или выключения выхода канала генератора. Для каждого канала предусмотрен отдельная кнопка ВКЛ/ВЫКЛ.

Навигация, выбор и регулировка параметров:

Для выбора требуемой формы сигнала или доступа к функциональному меню необходимо нажать соответствующую кнопку.

Sine
Frequency
Period
Amplitude
High Level
Offset
Low Level
Phase

Меню настроек служит для выбора параметров сигнала, выбранный параметр подсвечивается белым цветом. На картинке слева белым цветом выделен параметр «Частота/Frequency» — это означает что для корректировки доступно значение частоты выходного сигнала.



Большинство функций меню настроек имеет двухуровневую систему (ячейка меню разбивается на две строки). Для выбора функции первого уровня необходимо нажать соответствующую кнопку управления меню один раз, для выбора функции второго уровня необходимо нажать ту же кнопку второй раз. Например: в режиме формирования сигнала синусоидальной формы, при первом нажатии кнопки управления меню F1 белым подсветится параметр Frequency (Частота), при повторном нажатии кнопки F1 белым подсветится параметр Period (Период).

Если ячейка меню настроек не имеет разбивки на две строчки (как на картинке слева — меню AM Frequency, AM Depth), то это означает что данный пункт меню имеет одноуровневую структуру. Для выбора данного пункта меню достаточно однократного нажатия

соответствующей кнопки управления или касания пункта меню на экране прибора.

Некоторые меню, содержащие большое число пунктов, состоят из нескольких страниц. Для переключения на следующую страницу меню необходимо нажать кнопку, соответствующую пункту **Next Page**.

Регулировка выбранных параметров возможна несколькими способами: с помощью цифровой клавиатуры, путем прямого ввода требуемого значения или изменение с помощью вращения ручки регулятора конкретного разряда (выбор разряда производится с помощью курсорных кнопок).

Регулировка параметров выходного сигнала:



Экран прибора в режиме отображения параметров двух каналов

Синусоидальный сигнал:

Для перехода в режим формирования сигнала синусоидальной формы необходимо нажать кнопку  на передней панели прибора.

В режиме формирования синусоидального сигнала доступны следующие настройки:

- частота/период (Frequency/Period);
- амплитуда/верхний уровень (Amplitude/HighLevel);
- смещение/нижней уровень (Offset/LowLevel);
- фаза (Phase).

На рисунке видно, что активирован пункт меню **Freq/Частота**, горящий курсор расположен в окне настройки значения частоты. Это означает, что пользователю доступен ввод значения частоты выходного сигнала с помощью цифровой клавиатуры или ручки регулятора.



Режим формирования сигнала синусоидальной формы

Ниже в таблице описаны пункты меню настроек режима формирования сигнала синусоидальной формы.

Меню настроек режима формирования сигнала синусоидальной формы.

Возможные настройки	Описание меню
Frequency/Period (Частота/Период)	Настройка частоты или периода сигнала. Переключение между параметрами при повторном нажатии соответствующей кнопки управления меню или касания пункта меню
Amplitude/HighLevel (Амплитуда/Верхний уровень)	Настройка амплитуды или верхнего уровня сигнала. Переключение между параметрами при повторном нажатии соответствующей кнопки управления меню или касания пункта меню
Offset/LowLevel (Смещение/Нижний уровень)	Настройка постоянного смещения или нижнего уровня сигнала. Переключение между параметрами при повторном нажатии соответствующей кнопки управления меню или касания пункта меню
Phase/Фаза	Настройка фазы сигнала

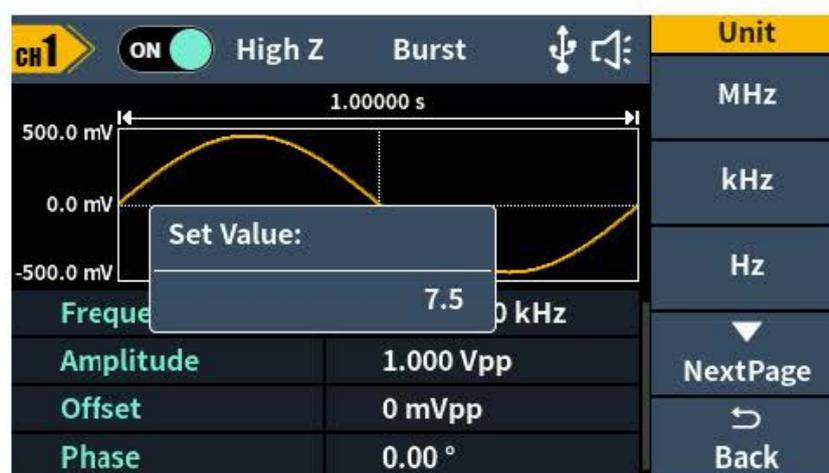
Установка частоты/периода:

1. Выбрать **Frequency** для перехода к настройкам частоты.

На дисплее будет отображаться значение частоты, установленное при включении питания или выбранное ранее оператором. При выборе другой функции значение частоты остается прежним, если оно допустимо для данной функции. Чтобы вместо частоты установить период, необходимо повторно нажать кнопку **Frequency**. Включится подсветка пункта меню **Period**.

2. Ввести требуемое значение частоты.

Для ввода требуемого значения частоты необходимо использовать цифровую клавиатуру, затем используя кнопки управления меню, выбрать соответствующую единицу измерения. Так же для изменения значения частоты можно использовать курсорные кнопки и ручку регулятора. С помощью курсорных кнопок выбрать необходимый разряд и, вращая ручку регулятора, произвести его изменение.



Настройка частоты

Установка уровня:

3. Выбрать **Amplitude** для перехода к настройкам амплитуды.

На дисплее будет отображаться значение уровня, установленное при включении питания или выбранное ранее оператором. При выборе другой функции значение уровня остается прежним, если оно допустимо для данной функции. Для установки уровня *по верхнему*

уровню повторно нажать кнопку **Ampl/HighLevel**. Для установки амплитуды *по нижнему уровню* нажать кнопку **Offset/LowLevel**.

4. Ввести требуемое значение выходного уровня сигнала.

Для ввода требуемого значения уровня необходимо использовать цифровую клавиатуру, затем используя кнопки управления меню, выбрать соответствующую единицу измерения. Так же для изменения значения уровня можно использовать курсорные кнопки и ручку регулятора. С помощью курсорных кнопок выбрать необходимый разряд и, вращая ручку регулятора, произвести его изменение.

Прямоугольный сигнал:

Для перехода в режим формирования сигнала прямоугольной формы необходимо нажать кнопку  на передней панели прибора.

В режиме формирования сигнала прямоугольной формы доступны следующие настройки:

- частота/период (Frequency/Period);
- амплитуда/верхний уровень (Amplitude/HighLevel);
- смещение/нижний уровень (Offset/LowLevel);
- фаза (Phase).

На рисунке видно, что активирован пункт меню **Frequency/Частота**, горящий курсор расположен в окне настройки значения коэффициента заполнения. Это означает, что пользователю доступен ввод значения коэффициента заполнения выходного сигнала с помощью цифровой клавиатуры или ручки регулятора.



Режим формирования сигнала прямоугольной формы

Ниже в таблице описаны пункты меню настроек режима формирования сигнала прямоугольной формы.

Меню настроек режима формирования сигнала прямоугольной формы.

Возможные настройки	Описание меню
Frequency/Period (Частота/Период)	Настройка частота или периода сигнала. Переключение между параметрами при повторном нажатии соответствующей кнопки управления меню или касания пункта меню
Amplitude/HighLevel (Амплитуда/Верхний уровень)	Настройка амплитуды или верхнего уровня сигнала. Переключение между параметрами при повторном нажатии соответствующей кнопки управления меню или касания пункта меню
Offset/LowLevel (Смещение/Нижний уровень)	Настройка постоянного смещения или нижнего уровня сигнала. Переключение между параметрами при повторном нажатии соответствующей кнопки управления меню или касания пункта меню
Phase/Фаза	Настройка фазы сигнала

Пилообразный сигнал:

Для перехода в режим формирования сигнала пилообразной формы необходимо нажать кнопку  на передней панели прибора.

В режиме формирования сигнала пилообразной формы доступны следующие настройки: частота/период (Frequency/Period), амплитуда/верхний уровень (Amplitude/HighLevel), смещение/нижней уровень (Offset/LowLevel), фаза (Phase) и коэффициент симметрии (Symmetry).



Режим формирования сигнала пилообразной формы

Ниже в таблице описаны пункты меню настроек режима формирования сигнала треугольной формы.

Меню настроек режима формирования сигнала треугольной формы.

Возможные настройки	Описание меню
Frequency/Period (Частота/Период)	Настройка частота или периода сигнала. Переключение между параметрами при повторном нажатии соответствующей кнопки управления меню или касания пункта меню
Amplitude/HighLevel (Амплитуда/Верхний уровень)	Настройка амплитуды или верхнего уровня сигнала. Переключение между параметрами при повторном нажатии соответствующей кнопки управления меню или касания пункта меню
Offset/LowLevel (Смещение/Нижний уровень)	Настройка постоянного смещения или нижнего уровня сигнала. Переключение между параметрами при повторном нажатии соответствующей кнопки управления меню или касания пункта меню
Phase/Фаза	Настройка фазы сигнала
Symmetry/Симметрия	Настройка коэффициента симметрии

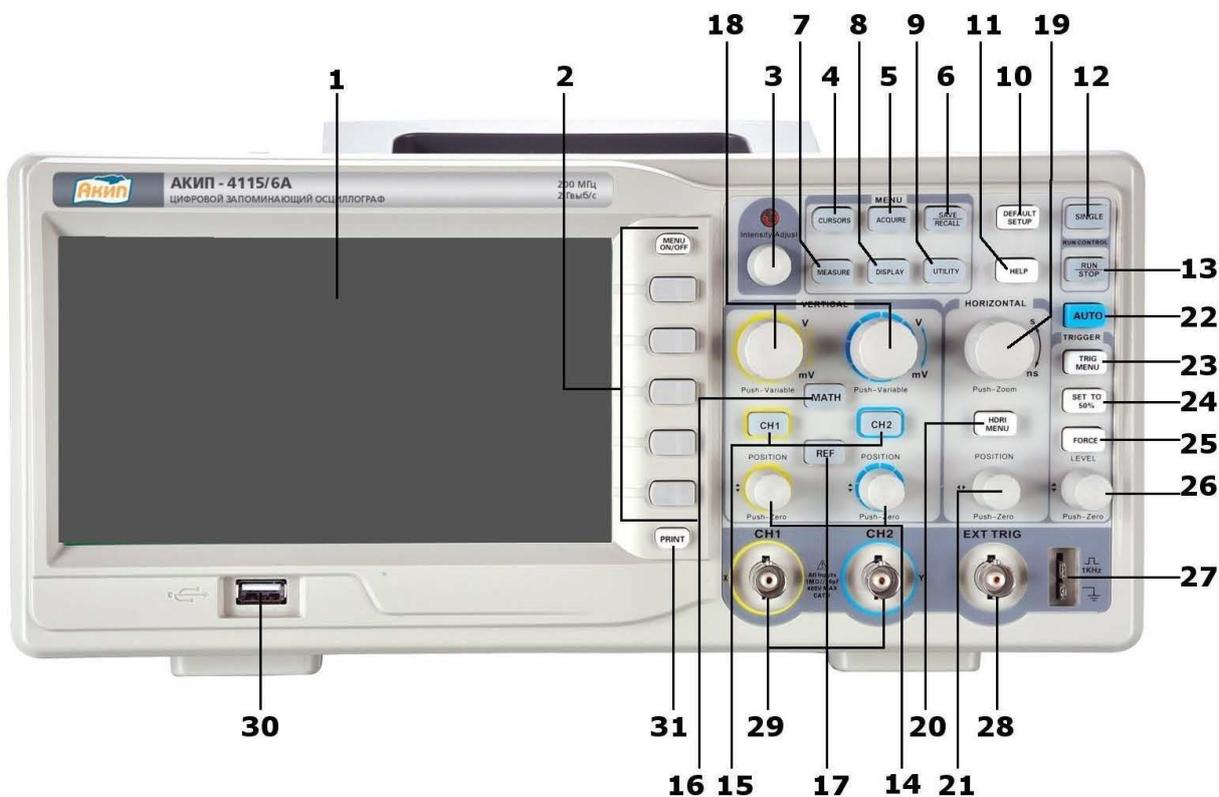
1.3. ОСЦИЛЛОГРАФ ЦИФРОВОЙ АКИП-4115/1А

Назначение:

Осциллограф предназначен для исследования и измерения параметров однократных сигналов и периодических сигналов в полосе частот 0...25 МГц. Осциллограф обеспечивает цифровое запоминание, цифровое измерение в диапазоне амплитуд от 2 мВ до 600 В (с делителем) и временных интервалов от 2,5 нс до 50 с, автоматическую установку размеров изображения, автоматическое измерение амплитудно-временных параметров входного сигнала с выводом результата измерения на экран цифрового запоминающего осциллографа (ЦЗО).

Назначение органов управления и индикации:

Передняя панель.



Передняя панель осциллографа АКИП 4115/1А

Назначение органов управления и индикации

№ на рис.	Кнопка, ручка	Описание меню
1		Жидко кристаллический экран
2		Кнопки управления меню. Далее термин «нажмите кнопку меню» означает нажатие кнопки справа от соответствующего меню, отображаемого на экране осциллографа. При наличии всплывающих меню, нажатие на соответствующие кнопки осуществляет выбор значений из всплывающего меню. Альтернативой выбора пунктов меню кнопками является выбор регулятором Установка (3). Кнопка «МЕНЮ ВКЛ/ВЫКЛ»/«MENU ON/OFF» включает или выключает отображение меню на экране осциллографа
3	Яркость/ Регулир. (INTENSITY/ ADJUST)	Многофункциональный регулятор Установка с кнопкой. При отсутствии всплывающих меню, вращение регулятора осуществляет регулировку яркости линии развертки. Яркость луча отображается на ЖКИ в процентах от максимального значения. При наличии всплывающих меню, вращение регулятора осуществляет выбор значений из всплывающего меню, нажатие на кнопку осуществляет выбор заданного значения. Если при наличии всплывающего меню выбрать соответствующий пункт, но не нажать регулятор, то через 5...10 секунд произойдет автовыбор параметра. Альтернативой выбора пунктов меню регулятором Установка является выбор последовательным нажатием на кнопки (2)
4	КУРСОР (CURSORS)	Курсоры — кнопка и индикатор включения меню управления курсорами Нажатие на кнопку выводит меню курсоров, повторное нажатие на кнопку убирает меню курсоров
5	СБОР ИНФ (ACQUIRE)	Сбор информации — кнопка и индикатор включения меню управления сбором информации. Нажатие на кнопку выводит меню сбора информации, повторное нажатие на кнопку убирает меню сбора информации

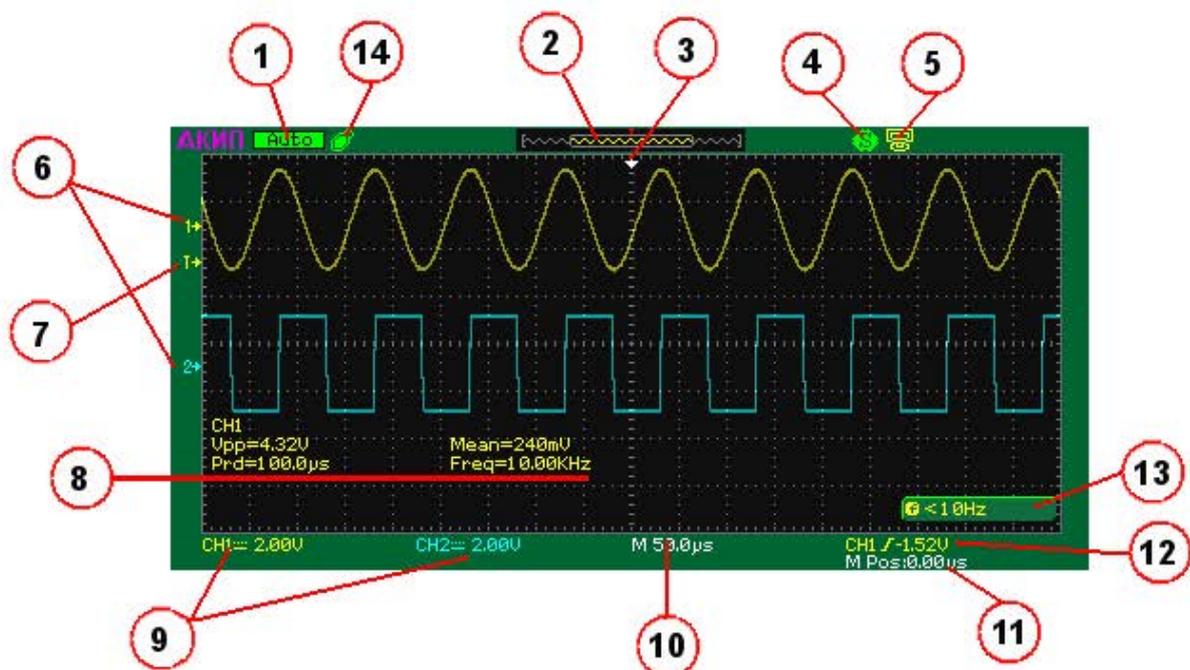
№ на рис.	Кнопка, ручка	Описание меню
6	ЗАП/ВЫЗ (SAVE/ RECALL)	Запись/Вызов — кнопка и индикатор включения меню управления записью/воспроизведением профилей и осциллограмм. Нажатие на кнопку выводит меню, повторное нажатие на кнопку убирает меню
7	ИЗМЕР (MEASURE)	Измерения — кнопка и индикатор включения и выключения меню измерений. Нажатие на кнопку выводит меню измерений, повторное нажатие на кнопку убирает меню измерений
8	ДИСПЛ (DISPLAY)	Экран — кнопка и индикатор включения и выключения меню управления режимами экрана. Нажатие на кнопку выводит меню, повторное нажатие на кнопку убирает меню
9	УТИЛИТЫ (UTILITY)	Утилиты — кнопка и индикатор включения меню утилит. Нажатие на кнопку выводит меню утилит, повторное нажатие на кнопку убирает меню утилит
10	НАЧ УСТ (DEFAULT SETUP)	Настройки по умолчанию — кнопка вызова начальных установок
11	ПОМОЩЬ (HELP)	Помощь — кнопка вызова подсказки управления осциллографом
<i>Органы управления запуском</i>		
12	ОДНОКР (SINGLE)	Однократный — кнопка и индикатор. Однократное нажатие на кнопку производит остановку процесса сбора информации. Повторное нажатие на кнопку переводит схему синхронизации в режим готовности к однократному запуску. Запуск развёртки будет осуществляться однократно только при наличии запускающего (входного) сигнала
13	ПУСК/СТОП (RUN/STOP)	Запуск/Стоп — кнопка запуска или остановки сбора информации
<i>Органы управления каналом вертикального отклонения</i>		
14	СМЕЩЕ- НИЕ (POSITION)	Смещение — кнопка и регулятор. Вращение регулятора производит смещение линии развертки выбранного канала в вертикальном направлении. Нажатие на регулятор производит установку смещения в нулевое значение (линия развертки устанавливается в центр экрана)

№ на рис.	Кнопка, ручка	Описание меню
15	КАН 1 КАН 2 (CH1, CH2)	Канал 1 и Канал 2 — кнопка и индикатор. Однократное нажатие на кнопку производит включение или выключение выбранного канала. При включении канала одновременно происходит переключение экранного меню на выбранный канал
16	МАТЕМ (MATH)	Математика — кнопка и индикатор управления меню математики. Нажатие на кнопку выводит меню математики, повторное нажатие на кнопку убирает меню математики
17	ОПОРН (REF)	Опорные кнопка и индикатор включения или выключения меню управления записью опорных осциллограмм. Нажатие на кнопку выводит меню, повторное нажатие на кнопку убирает меню
18	В-мВ (V-mV)	В-мВ (Вольт/дел) — регулятор и кнопка установки коэффициента отклонения выбранного канала. Вращение регулятора изменяет значение коэффициента отклонения «грубо». При нажатии на регулятор, осциллограф переключается в режим изменения значения коэффициента отклонения «плавно». Значение выбранного режима «грубо» или «плавно» отображается только в экранном меню. Для возврата в режим «грубо» нажать на регулятор еще раз
<i>Органы управления каналом горизонтального отклонения</i>		
19	СМЕЩЕ- НИЕ (POSITION)	Смещение — кнопка и регулятор. Вращение регулятора производит к смещению линии развертки в горизонтальном направлении (изменение временной задержки по отношению к центральной горизонтальной линии). Для установки нулевого значения задержки нажать на регулятор
20	ГОРИЗ МЕ- НЮ (HORIZ MENU)	Горизонтальное меню — кнопка и индикатор включения или выключения горизонтального меню. Нажатие на кнопку выводит меню, повторное нажатие на кнопку убирает меню

№ на рис.	Кнопка, ручка	Описание меню
21	с-нс (s-ns)	с-нс (Время/деление) — регулятор и кнопка установки времени развертки. Вращение регулятора изменяет значение коэффициента развертки. Нажатие на регулятор производит к переключению в режиме выделения окна для растяжки. Растяжка осуществляется в экранном меню. Если значение коэффициента развертки было изменено после остановки сбора информации, для возвращения к исходному значению нажать на регулятор «Время/деление»
<i>Органы управления запуском развертки</i>		
22	АВТО (AUTO)	Авто установка — кнопка автоматического поиска сигнала и установки оптимального размера изображения на экране
23	МЕНЮ СИНХР (TRIG MENU)	Меню синхронизации — кнопка и индикатор включения или выключения меню управления режимами синхронизации. Нажатие на кнопку выводит меню, повторное нажатие на кнопку убирает меню
24	УСТ НА 50 % (SET TO 50 %)	Установка на 50 % — кнопка установки уровня запуска на 50 % от уровня сигнала
25	ФОРС (FORCE)	Перезапуск — кнопка, при нажатии которой происходит перезапуск сбора информации, сброс усреднений, результатов измерений и пр.
26	УРОВЕНЬ (LEVEL)	Уровень — кнопка и регулятор. Вращение регулятора производит изменение уровня запуска. Нажатие на регулятор производит автоматическую установку уровня синхронизации равным 0 мВ
<i>Разъемы передней панели</i>		
27		Калибратор — выход калибратора 1 кГц 3 В для компенсации делителей
28	ВНЕШ СИНХР (EXT TRIG)	Внешняя — гнездо входа внешней синхронизации

№ на рис.	Кнопка, ручка	Описание меню
29	КАН 1 X КАН 2 Y (CH1 X, CH2 Y)	Входные гнезда Канала 1 и Канала 2
30	USB	Разъем подключения внешнего USB носителя
31	ПЕЧАТЬ (PRINT)	Печать — в зависимости от выбранного режима это кнопка сохранения осциллограмм в графическом виде или запуска печати на принтер
32		Кнопка включения/выключения сетевого питания

Символы индикации экрана осциллографа:

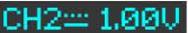
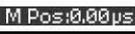
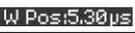
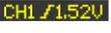


Окно осциллографа АКПП-4115А

Символы индикации экрана осциллографа

	Символ	Описание функции
1		Индикатор отображения состояния схемы синхронизации. Осциллограф находится в режиме синхронизации
		Сбор информации остановлен
		Развертка осциллографа находится в режиме самописца

	Символ	Описание функции
2		Индикатор соотношения отображения на экране видимой части осциллограммы и полной длины памяти сбора информации. Отображаемая на экране часть памяти меньше, чем полная длина памяти осциллографа (часть информации находится с лева и справа от экрана)
		Отображаемая на экране часть памяти больше, чем полная длина памяти осциллографа
	T	Символ обзорной индикации расположения точки запуска развертки по отношению к полной длине памяти. При времени задержки равном 0 с, будет располагаться посередине экрана. При времени задержки со знаком «-» (предзапуск смещается вправо), при времени задержки со знаком «+» (послезапуск смещается влево)
4		Индикатор отображения режима печати экранного изображения при нажатии кнопки «Print», расположенной на передней панели осциллографа. Режим печати экрана на принтер
		Режим сохранения экрана как «bmp.» файла
5		Индикатор отображения режима работы USB разъема расположенного на задней панели осциллографа. Режим работы разъема задан как передача данных на ПК
		Режим работы разъема задан как печать на USB принтер
6		Индикатор точки земли Канала 1
		Индикатор точки земли Канала 2
7		Индикатор уровня синхронизации. При синхронизации от Канала 1 имеет желтый цвет, при синхронизации от Канала 2 имеет синий цвет
8		Результаты измерений после нажатия на кнопку автоустановки «AUTO». При выборе синхронизации от Канала 1 результаты измерений имеют желтый цвет, при выборе синхронизации от Канала 2 результаты измерений имеют синий цвет

	Символ	Описание функции
9		Значок осциллограммы канала показывает настройки вертикального отклонения. В крайнем левом углу заголовка (окрашенная зона)
		показан номер канала. В заголовке присутствует и другая информация — Вид связи, Значение коэффициента отклонения и Включение ограничения ширины полосы пропускания
		Связь по переменному току
		Связь по постоянному току
		Вход отключен от входного сигнала и заземлен
	B	Включено ограничения ширины полосы пропускания 20 МГц
10		Значение коэффициента развертки основной развертки
		Значение коэффициента развертки растяжки
11		Значение времени задержки основной развертки
		Значение времени задержки растяжки
12	 	Индикатор источник синхронизации, вида синхронизации и уровня синхронизации. При синхронизации от Канала 1 имеет желтый цвет, при синхронизации от Канала 2 имеет синий цвет
13		Синхронизации по нарастающему фронту
		Синхронизации по спадающему фронту
		Синхронизации по любому фронту
		Синхронизации по параметрам положительного импульса
		Синхронизации по параметрам отрицательного импульса
	 	ТВ синхронизация
		Синхронизации по скорости нарастания
		Синхронизации по скорости спада
		Попеременный запуск — поочередно от Канала 1 и Канала 2 (только по фронту)
14		Индикатор подключения USB устройства к разъему, расположенному на передней панели осциллографа

Органы управления передней панели:

Органы управления канала вертикального отклонения.

Вертикальная регулировка является одноканальной, то есть каждый из каналов имеет независимые органы управления. Для включения канала нажмите его кнопку. Для выключения канала нажмите его кнопку еще раз.

Если канал активен, то подсвечивается экранная кнопка соответствующего канала и на экране отображается коэффициент отклонения включенного канала. Канал 1 отображается желтым цветом, Канал 2 отображается — синим цветом.

Если ни одна из канальных кнопок не горит, это означает, что, либо ни один из каналов не включен, либо активирована одна из осциллограмм — математики, растяжки или памяти. В этом случае ручки вертикального смещения и усиления ($V-mV/V-mV$) регулируют положение и масштаб по вертикали соответствующих осциллограмм математики, растяжки или памяти (опорный сигнал).

При включенном режиме математики кнопка подсвечивается — кнопка МАТЕМ/MATH и появляется осциллограмма зеленого цвета. Для отключения математической функции нажать на кнопку МАТЕМ/MATH (математика) еще раз, кнопка гаснет, и осциллограмма математики исчезает.

При включенном режиме опорных осциллограмм подсвечивается кнопка ОПОРН/REF и появляются осциллограммы красного и фиолетового цветов. Для отключения опорных осциллограмм нажать на кнопку ОПОРН/REF (опорные) еще раз, кнопка гаснет и осциллограммы исчезают.

Регулировка смещения:

Регулятор СМЕЩЕНИЕ/POSITION (18) позволяет перемещать осциллограмму сигнала по вертикали, и это перемещение калибровано. При повороте регулятора значение напряжения в течение короткого времени отображается на экране, указывая, как далеко уровень земли сигнала находится от центра экрана. Маркер уровня земли на левой стороне экрана перемещается в соответствии с действием регу-

лятора. Для возврата к нулевому смещению линии развертки нажать на ручку регулятора при этом положение осциллограммы мгновенно вернется к нулю. Этот режим ускоренного переключения особенно полезен, когда положение осциллограммы находится далеко за экраном, и необходимо немедленно вернуть его к центру экрана.

Изменение коэффициента отклонения:

Изменение коэффициента отклонения (вертикальной чувствительности) осуществляется при помощи регулятора В-мВ/V-mV (14), текущее значение коэффициента отклонения отображается в строке состояния на экране осциллографа.

Для изменения коэффициента отклонения необходимо:

Нажмите кнопку КАН 1/CH1 или КАН 2/CH2;

При этом на экране появится меню функциональных кнопок, и Канал 1 (Канал 2), будет включен (или останется включенным, если это было сделано ранее);

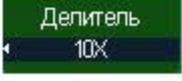
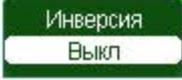
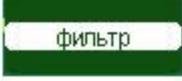
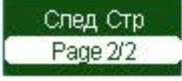
Нажатием на функциональную кнопку меню В/Дел, выбрать шаг изменения вертикального масштаба: Грубо или Точно;

Вращать регулятор В-мВ/V-mV (14) для установки необходимого масштаба изображения сигнала.

Примечание: Переключать режимы Грубо/Точно можно не только используя меню каналов 1 и 2, но также просто нажав на регулятор В-мВ/V-mV (14).

Использование экранного меню канала вертикального отклонения

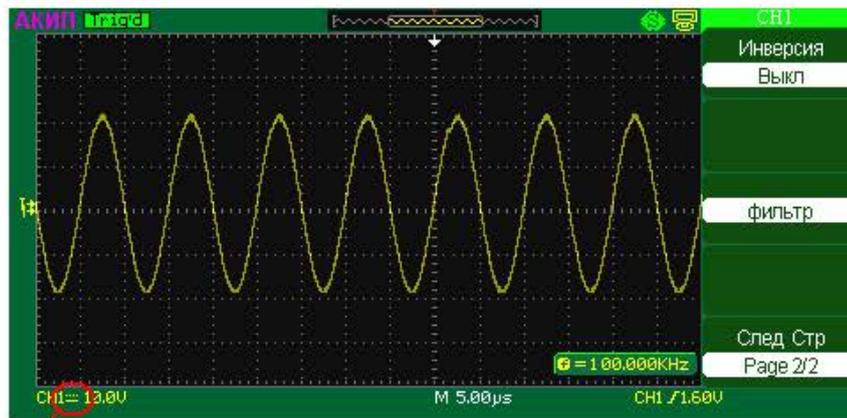
Всплывающее меню	Описание меню
	<p>Выбор связи входа. Возможен выбор одного из трех состояний — АС, DC и земля.</p> <p>АС — Блокируется составляющую постоянного тока во входном сигнале.</p> <p>DC — Пропускаются обе составляющие и пост. и перемен. тока входного сигнала.</p> <p>Земля — Отключает входной сигнал от входа осциллографа и замыкает вход осциллографа на корпус прибора</p>

Всплывающее меню	Описание меню
	<p>Выбор ограничения полосы пропускания (ПП) канала вертикального отклонения. Вкл — Ограничивает ширину полосы пропускания канала до 20MHz для уменьшения шумов экрана. Выкл — Полная полоса пропускания</p>
	<p>Выбор режима: Грубо (Coarse) или Плавно (Fine) — установка коэффициента отклонения регулятором В-мВ на передней панели. Переключение между режимами грубой (Coarse) и плавной (Fine) осуществляется кнопкой справа. Активный режим выделен квадратом.</p> <p>Грубо — коэффициент развертки изменяется в пределах от 2 мВ до 5 В с шагом 1 — 2–5.</p> <p>Точно — коэффициент развертки изменяется плавно</p>
	<p>Выбор коэффициента деления внешнего пробника, необходим для корректного результата автоматических или курсорных измерений</p>
	<p>Переход к 2 странице главного меню</p>
	<p>Инверсия входного сигнала. Включение или выключение инверсии осуществляется кнопкой справа. Активный режим выделен квадратом. <i>Примечание:</i> При сохранении формы сигнала, сигнал сохраняется без инверсии</p>
	<p>Использование цифровых фильтров для выбранного канала</p>
	<p>Возвращение к 1 странице главного меню</p>

Связь канала по входу:

Если на вход осциллографа поступает сигнал с постоянной составляющей, то использование режима связи АС позволяет исключить эту составляющую из сигнала.

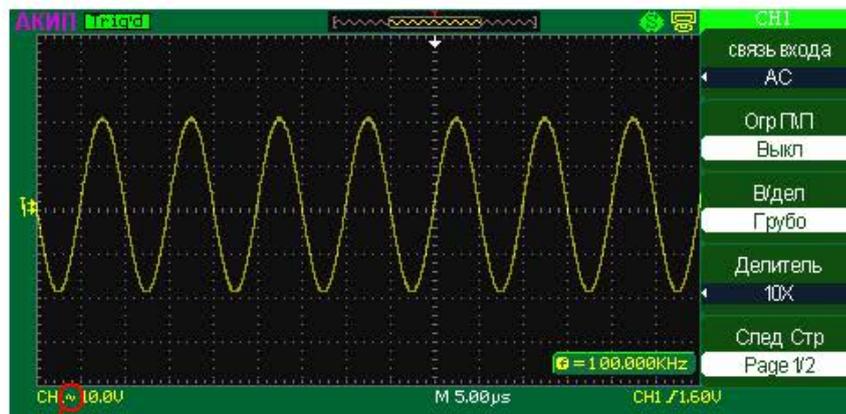
Так на рисунке ниже приведен пример отображения сигнала с положительной постоянной составляющей.



Индикатор связи по
постоянному току

Связь по постоянному току

Нажать кнопку CH1/КАН 1 → Связь входа → АС для установки связи по переменному току для канала 1. Это блокирует постоянную компоненту входного сигнала. Осциллограмма сигнала без постоянной составляющей показана на рисунке ниже.

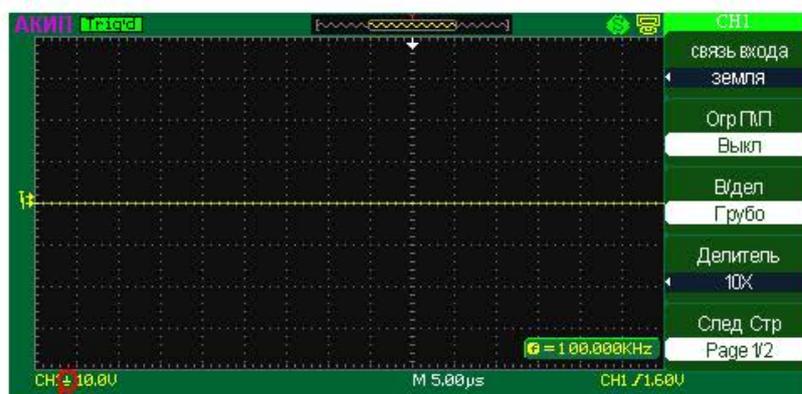


Индикатор связи по
переменному току

Связь по переменному току

Нажать кнопку CH1/КАН 1 → Связь входа → DC для установки связи по постоянному току для канала 1. Это опять позволит пропустить обе компоненты входного сигнала постоянную и переменную.

Нажмите кнопку СН1/КАН 1 → Связь входа → Земля для замыкания канала 1 на землю. Эта установка отключает входной сигнал.



Индикатор связи
замыкание на землю

Замыкание на землю

Органы управления канала горизонтального отклонения:

Осциллограф отображает сигналы, используя сетку с горизонтальным масштабом время на деление. Поскольку все активные осциллограммы используют одну и ту же временную развертку, то прибор отображает только одно значение для всех активных каналов, кроме случаев, когда используется увеличение фрагмента (Расширение) или попеременный запуск.

Горизонтальные элементы управления могут изменять горизонтальные масштаб и положение осциллограмм. Горизонтальный центр экрана — временная точка начала отсчета для осциллограмм. Изменение горизонтального масштаба приводит к растягиванию или сжатию осциллограммы относительно центра экрана. Регулятор горизонтального положения изменяет положение осциллограмм относительно момента запуска.

Горизонтальные регуляторы:

Время/деление (с-нс/s-ns) — Установка требуемого Коэффициента развертки. Осциллограф АКПП-4115А автоматически определя-

ет частоту дискретизации исходя из установленного значения коэффициента развертки.

Первое нажатие на регулятор включает режим выделения зоны растяжки. Зона растяжки выделена двумя вертикальными курсорами. Перемещение курсоров по горизонтали осуществляется регулятором **СМЕЩЕНИЕ/Position**. Изменение размера окна растяжки осуществляется вращением регулятора **Время/деление (с-нс/s-ns)**.

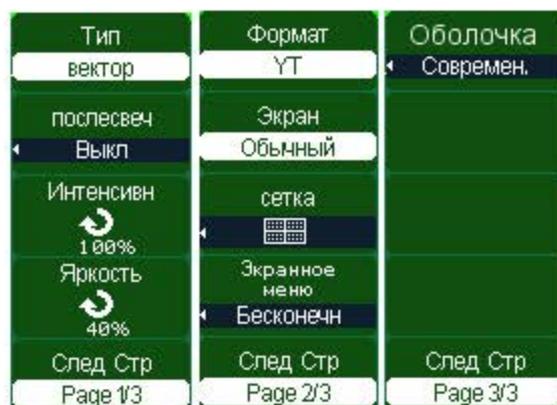
Второе нажатие на регулятор осуществляет растяжку всех осциллограмм. Изменение коэффициента масштабирования осуществляется вращением регулятора **Время/деление (с-нс/s- ns)**. Перемещение осциллограмм по горизонтали осуществляется регулятором **СМЕЩЕНИЕ/Position**.

Примечание: уменьшить размер изображения меньше исходного невозможно. Третье нажатие на регулятор отключает режим растяжки.

Смещение/Position — изменяет горизонтальное положение осциллограмм всех каналов (включая MATH). Чувствительность этого регулятора меняется вместе с изменением длительности развертки. Нажатие на ручку этого регулятора сбрасывает смещение момента запуска (trigger offset) и возвращает его к горизонтальному центру экрана.

Настройки экрана:

Нажмите на кнопку **ДИСПЛ** на передней панели ЦЗО, появится главное меню настроек дисплея:



Перечень меню настроек дисплея

Функция меню	Описание настройки функции меню
Тип вектор	Выбор способа отображения осциллограммы — векторный или точечный. Примечание: при исследовании периодического сигнала в реальном масштабе времени, для которого соотношение частоты дискретизации и частоты входного сигнала менее 10, использование векторного представления сигнала может исказить истинную форму сигнала. Во избежание такого рода искажений используйте режим эквивалентной дискретизации или точечный способ отображения
послесвеч Выкл	Включение (Выключение) режима послесвечения. Регулятором Установка на передней панели ЦЗО или нажатием на кнопку справа от иконки, можно выбрать следующие значения послесвечения off (выкл), 1с, 2с, 5с и ∞. Используется только, когда сигнал обновляется периодически. В режиме Самописца не доступно
Интенсивн 100%	Регулировка яркости свечения линии луча. Регулировка осуществляется регулятором Установка на передней панели ЦЗО. Данная регулировка аналогична регулировке яркости на передней панели осциллографа при выключенных экранных меню
Яркость 40%	Регулировка яркости сетки. Регулировка осуществляется регулятором Установка на передней панели ЦЗО
Формат Y-T	Тип представления входного сигнала. Классический Y-T, X-Y, для наблюдения фигур Лиссажу без синхронизации
Экран Обычный	Тип представления экрана осциллографа. Обычный — Классический экран черного цвета Инверсия — инверсный экран белого цвета
сетка	Выбор типа шкалы ЦЗО. В подменю можно выбрать типа шкалы Полная —  Только оси —  Только обрамление — 
Экранное меню Бесконечн	Установка времени присутствия на экране экранного меню Регулятором Установка на передней панели ЦЗО или нажатием на кнопку справа от иконки, можно выбрать следующие значение 2с, 5с, 10с, 20с и бесконечность
Оболочка Современ.	Выбор оболочки экрана (цветовой гаммы): классика, современный, традиционный, простой

2. НАБЛЮДЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Цель работы: изучение способа измерения амплитуды U_0 , периода T , частоты f и величины эффективного напряжения $U_{\text{эфф}}$ электрического гармонического колебания. Источниками сигналов являются генераторы сигналов. Параметры колебаний напряжения измеряются с помощью осциллографа и универсального вольтметра. Предлагается измерить вольтметром значения сопротивлений участков электрических цепей.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ

Выполнение работы:

Необходимые приборы и их совместное подключение. В работе используются описанные ранее контрольно-измерительные приборы и лабораторный стенд. Соединение приборов для оценки параметров электрических сигналов осуществляется по схеме, показанной на рис. 2.1, путем подключения их выходных и входных кабелей к клеммам лабораторного стенда в его правой нижней части наборного поля (рис. 2.2).

Порядок выполнения работы:

Согласно инструкциям по эксплуатации приборов, изложенным в лабораторной работе № 1, проведите пять измерений параметров гармонических сигналов с фиксированной частотой, выбранной произвольно в пределах от 100 Гц до 10 кГц, но с разными амплитудами. Результаты измерений запишите в табл. 2.1, где в скобках указаны типы приборов, используемых в данных измерениях.

В табл. 2.2 запишите возможные изменения максимального уровня сигналов пилообразной, прямоугольной и синусоидальной

формы при изменении частоты от 100 Гц до 10 кГц. Измерения проводите с помощью осциллографа, устанавливая минимальные значения напряжений на горизонтальную реперную линию. Оцените погрешности измерений амплитуды колебания при его симметрировании (см. табл. 2.1) и при оценке двойной амплитуды.

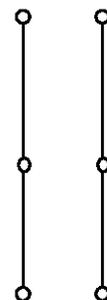
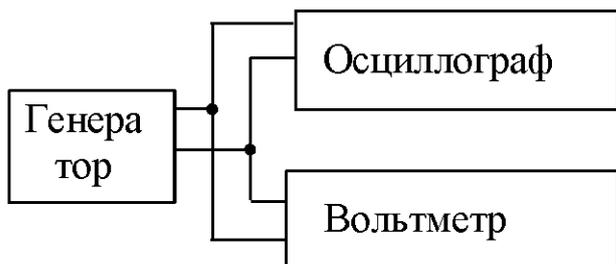


Рис. 2.1. Схема соединения приборов

Рис. 2.2. Наборное поле стенда

При заполнении таблиц желательно записывать размерности величин такими, какими их измеряет прибор — мс, мкс, кГц, мВ и т. д. Это общепринятый подход на производстве.

Таблица 2.1

Результаты измерений

Но- мер опыта	f_1 , Гц (Гене- ратор)	T , с (Осцил- логграф)	$f_2 = \frac{1}{T}$, Гц	U_0 , В (Осцил- логграф)	$U_{эфф} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$, В	$U_{эфф}$, В (Вольт- метр)
1						
2						
3						
4						
5						

Результаты измерений

Номер опыта	f_1 , Гц (Генератор)	T , с (Осциллограф)			$2U_0$, В (Осциллограф)		
							
1							
2							
3							
4							
5							

ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Цель работы: изучение способа измерения активного сопротивления на участках электрической цепи. Вольтметр используется в качестве омметра.

Выполнение работы:

Необходимые приборы: в работе используются универсальный вольтметр и лабораторный стенд.

Порядок выполнения работы:

Согласно инструкции по эксплуатации вольтметра, включенного в режиме омметра, нужно измерить известные сопротивления в лабораторных работах № 5 и № 7 и сравнить их с данными в табл. 2.3.

Результаты измерений

Данные	Сопротивления в лабораторной работе № 5			Сопротивления в лабораторной работе № 7			
	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом
Справочные	470	680	820	100	100	100	1000
Опытные							

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите порядок измерения амплитуды периодического сигнала с помощью электронного осциллографа.
2. Опишите порядок измерения периода и частоты периодического сигнала с помощью осциллографа.
3. Опишите способ измерения эффективных значений напряжения гармонических сигналов с помощью прибора.
4. Опишите способ измерения уровня периодических сигналов различной формы с помощью генератора сигналов и осциллографа.
5. Опишите порядок измерения активных сопротивлений с помощью вольтметра.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА

Цель работы: изучение законов электростатики и одного из методов измерения емкости конденсатора.

Краткая теория:

Конденсатором называется система, состоящая из двух проводников, в которой обеспечивается сильная электрическая связь между накопленными на этих проводниках зарядами. Проводники, образующие конденсатор, называются обкладками. В зависимости от формы обкладок конденсаторы бывают сферические, цилиндрические, плоские. За заряд конденсатора принимается заряд одной обкладки, взятый по абсолютной величине.

Емкостью конденсатора называется скалярная физическая величина, характеризующая способность конденсатора накапливать электрический заряд, и численно равная заряду, который должен быть перенесен с одной обкладки конденсатора на другую, чтобы разность потенциалов между ними изменилась на единицу.

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta \varphi}. \quad (3.1)$$

Емкость конденсатора зависит от формы и размеров его обкладок, диэлектрической проницаемости материала диэлектрика и не зависит от свойств проводников, из которых изготовлены обкладки. Единицей измерения электрической емкости в системе СИ является Фарад $[C] = \Phi = Кл / В$.

Емкость конденсатора может быть измерена различными методами. В данной работе использован косвенный метод, основанный на измерении накопленного конденсатором заряда и величины разности потенциалов между обкладками. При этом емкость рассчитывается в соответствии с определением (3.1).

Для определения емкости неизвестного конденсатора C_x собирают цепь по рис. 3.1.

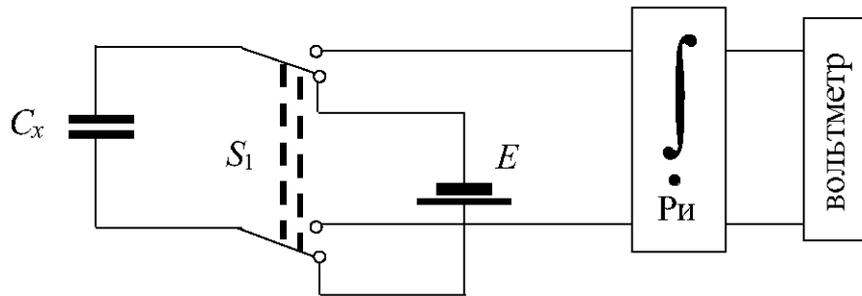


Рис. 3.1. Схема электрической цепи для определения емкости конденсатора:

C_x – конденсатор неизвестной емкости; E – источник питания, служащий для зарядки конденсатора до разности потенциалов, равной ЭДС источника ($\Delta\varphi = E$); \int – интегратор тока;

$Pи$ – кнопка разряда интегратора; S_1 – переключатель, позволяющий подключать конденсатор к источнику питания E при зарядке и к интегратору при разрядке.

При подключении к источнику питания конденсатор заряжается. Заряд, накапливаемый на обкладках конденсатора, при неизменном значении разности потенциалов $\Delta\varphi$ пропорционален его емкости. В стационарном состоянии разность потенциалов равна ЭДС источника E .

$$\Delta q = C_x \cdot E. \quad (3.2)$$

При разрядке конденсатора в цепи протекает убывающий во времени электрический ток. По определению, сила тока

$$I(t) = \frac{dq}{dt}. \quad (3.3)$$

Нас интересует заряд Δq , т. е. необходимо вычислить

$$\Delta q = \int_0^{\infty} I dt.$$

Для этого служит электронное устройство, называемое интегратором.

При подключении заряженного конденсатора к интегратору, который в свою очередь подключен к вольтметру, в цепи интегратора протекает ток. Напряжение на выходе интегратора пропорционально интегралу от силы тока на его входе, т. е. заряду:

$$U_x = b \int I(t) dt = b \int \frac{dq}{dt} \cdot dt = b \int dq = b \Delta q, \quad (3.4)$$

где b — постоянная интегратора (она неизвестна).

Напряжение U_x измеряется цифровым вольтметром. Сопоставляя формулы (3.2) и (3.4), получаем:

$$\frac{U_x}{b} = C_x \cdot E. \quad (3.5)$$

В полученном выражении постоянная интегратора b и разность потенциалов на конденсаторе, численно равная E , являются неизвестными. Поэтому только на основании выражения (3.5) определить C_x оказывается невозможным. Для того чтобы избежать определения величин b и E , в данной работе применяется хорошо известный метод калибровки (метод сравнения). Включим вместо конденсатора C_x конденсатор с известной емкостью C_1 и проведем аналогичные измерения. При этом на выходе интегратора получим отсчет U_1 , и по аналогии с выражением (3.5) запишем

$$\frac{U_1}{b} = C_1 \cdot E. \quad (3.6)$$

Разделив друг на друга равенства (3.5) и (3.6), получим

$$C_x = \frac{U_x}{U_1} C_1, \quad (3.7)$$

где U_x и U_1 — показания вольтметра при разряде неизвестного и известного конденсаторов соответственно (максимальные значения показаний на индикаторном табло вольтметра);

C_1 — емкость известного конденсатора.

Конденсаторы широко используются в различных областях техники: в электронике, электротехнике, энергетике. В горном деле энергия заряженных конденсаторов используется при взрывных работах для воспламенения детонаторов. На импульсном выделении энергии при разряде конденсаторов основан метод электрогидравлической очистки скважин. В обогащении полезных ископаемых конденсаторы находят применение при электросепарации слабомагнитных руд. В состав электронных геофизических приборов конденсаторы входят в качестве одной из составных частей. Разрабатываются специальные конструкции конденсаторов для работы во взрыво- и пожароопасных условиях.

Выполнение работы:

Необходимые приборы: конденсатор с известной емкостью ($C_1 = 4\,700\text{ пФ} \pm 10\%$), конденсатор с неизвестной емкостью C_x , источник постоянного тока с ЭДС E , переключатель S_1 , интегратор, цифровой вольтметр. Все элементы схемы, кроме вольтметра, смонтированы внутри лабораторного стенда.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.2 и на панели лабораторного стенда.

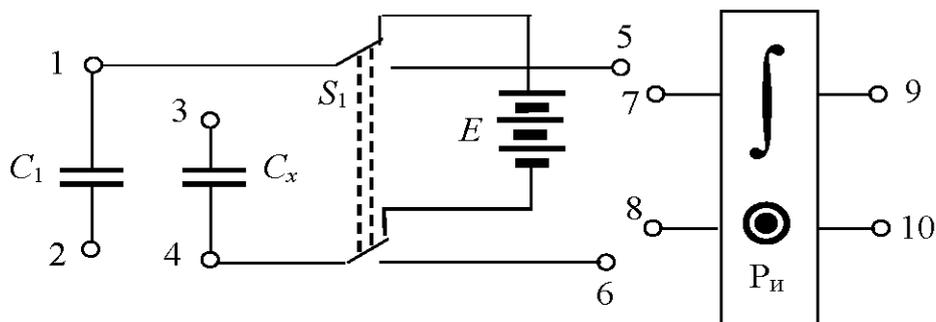


Рис. 3.2. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы:

1. Подготовьте цифровой вольтметр к работе согласно инструкции по эксплуатации.

2. Подготовьте схему для измерения емкости неизвестного конденсатора C_x , для чего гибкими перемычками попарно соедините клеммы 1 – 3, 5 – 7, 6 – 8, а выходные клеммы интегратора 9 и 10 соедините с входом вольтметра (см. рис. 3.2).

3. Включите лабораторный стенд тумблером, расположенным в левой части передней стенки.

4. Переключателем S_1 конденсатор C_x подключается к источнику E (S_1 в *верхнем* положении) и заряжается (время полной зарядки конденсатора ~ 10 с).

5. Интегратор разряжается нажатием кнопки $P_{и}$. Кнопка $P_{и}$ на интеграторе предназначена для его принудительного разряда и подготовки прибора к новому измерению.

6. Затем переключателем S_1 неизвестный конденсатор подключается к интегратору (S_1 в *нижнем* положении). Поскольку используемый в данной работе интегратор не является идеальным, происходит его самопроизвольный разряд по окончании процесса интегрирования. Поэтому в качестве U_x следует принимать максимальное значение показаний на табло вольтметра по истечении не более 5 секунд. Показание U_x на табло вольтметра записывается в табл. 3.1.

7. Измерения показаний вольтметра при разрядке неизвестного конденсатора проводят 5 раз.

8. После этого клеммы 1 и 3 размыкаются, а клеммы 2 и 4 замыкаются (см. рис. 3.2). При этом вместо неизвестного конденсатора в цепь включается конденсатор с известной емкостью C_1 . С ним проводят пять измерений, согласно вышеописанному порядку. Результаты U_1 также записываются в табл. 3.1.

9. Конденсаторы C_x и C_1 соединяются параллельно путем добавления перемычки между клеммами 1 и 3. Проводится пять измерений для цепи из двух параллельно соединенных конденсаторов.

10. Конденсаторы C_x и C_1 соединяются последовательно, для чего удаляют перемычки 1 – 3, 2 – 4 и устанавливают перемычку между клеммами 2 и 3. Проводятся пять измерений для цепи из двух последовательно соединенных конденсаторов. Все результаты также записываются в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты измерений

Номер опыта	Неизвестная емкость C_x		Известная емкость C_1		Параллельное соединение		Последовательное соединение	
	$U_x, В$	$\Delta U_x, В$	$U_1, В$	$\Delta U_1, В$	$U_{\text{пар}}, В$	$\Delta U_{\text{пар}}, В$	$U_{\text{пос}}, В$	$\Delta U_{\text{пос}}, В$
1								
2								
3								
4								
5								
Средние значения	$\bar{U}_x =$	$\Delta \bar{U}_x =$	$\bar{U}_1 =$	$\Delta \bar{U}_1 =$	$\bar{U}_{\text{пар}} =$	$\Delta \bar{U}_{\text{пар}} =$	$\bar{U}_{\text{пос}} =$	$\Delta \bar{U}_{\text{пос}} =$

Определяются средние значения показаний вольтметра \bar{U}_x , \bar{U}_1 , $\bar{U}_{\text{пар}}$, $\bar{U}_{\text{пос}}$. По этим средним значениям вычисляются опытные значения величин емкостей.

$$\bar{C}_x = \frac{\bar{U}_x}{\bar{U}_1} C_1; \quad (3.8)$$

$$\bar{C}_{\text{пар}} = \frac{\bar{U}_{\text{пар}}}{\bar{U}_1} C_1; \quad (3.9)$$

$$\bar{C}_{\text{пос}} = \frac{\bar{U}_{\text{пос}}}{\bar{U}_1} C_1. \quad (3.10)$$

Теоретическое значение емкости параллельного соединения конденсаторов вычисляется следующим образом:

$$C_{\text{пар}} = \bar{C}_x + C_1. \quad (3.11)$$

При последовательном соединении конденсаторов:

$$\frac{1}{C_{\text{пос}}} = \frac{1}{\bar{C}_x} + \frac{1}{C_1}, \quad (3.12)$$

откуда следует расчетная формула для вычисления емкости последовательного соединений двух конденсаторов C_x и C_1 :

$$C_{\text{пос}} = \frac{\bar{C}_x \cdot C_1}{\bar{C}_x + C_1}. \quad (3.13)$$

Используя значение C_x , рассчитанное по формуле (3.8), вычислите по формулам (3.12) и (3.13) значения емкостей параллельного и последовательного соединений конденсаторов. Результат расчетов сравните с экспериментальными значениями, определенными по формулам (3.9) и (3.10).

Вычисление погрешностей:

Относительные погрешности измерения δ емкостей вычисляются по формулам:

$$\delta_{C_x} = \frac{\Delta \bar{C}_x}{\bar{C}_x} = \frac{\Delta \bar{U}_x}{\bar{U}_x} + \frac{\Delta \bar{U}_1}{\bar{U}_1} + \frac{\Delta C_1}{C_1}; \quad (3.14)$$

$$\delta_{C_{\text{ПАР}}} = \frac{\Delta \bar{C}_{\text{пар}}}{\bar{C}_{\text{пар}}} = \frac{\Delta \bar{U}_{\text{пар}}}{\bar{U}_{\text{пар}}} + \frac{\Delta \bar{U}_1}{\bar{U}_1} + \frac{\Delta C_1}{C_1}; \quad (3.15)$$

$$\delta_{C_{\text{пос}}} = \frac{\Delta \bar{C}_{\text{пос}}}{\bar{C}_{\text{пос}}} = \frac{\Delta \bar{U}_{\text{пос}}}{\bar{U}_{\text{пос}}} + \frac{\Delta \bar{U}_1}{\bar{U}_1} + \frac{\Delta C_1}{C_1}, \quad (3.16)$$

где $\Delta C_1 / C_1 = 0,1$ — относительная погрешность C_1 .

Средние абсолютные погрешности емкостей:

$$\Delta \bar{C}_x = \delta_{C_x} \cdot \bar{C}_x; \quad (3.17)$$

$$\Delta \bar{C}_{\text{пар}} = \delta_{C_{\text{пар}}} \cdot \bar{C}_{\text{пар}}; \quad (3.18)$$

$$\Delta \bar{C}_{\text{пос}} = \delta_{C_{\text{пос}}} \cdot \bar{C}_{\text{пос}}. \quad (3.19)$$

Окончательные результаты измерения емкостей конденсаторов записываются в виде

$$C_x = \bar{C}_x \pm \Delta \bar{C}_x; \quad (3.20)$$

$$C_{\text{пар}} = \bar{C}_{\text{пар}} \pm \Delta \bar{C}_{\text{пар}}; \quad (3.21)$$

$$C_{\text{пос}} = \bar{C}_{\text{пос}} \pm \Delta \bar{C}_{\text{пос}}. \quad (3.22)$$

Сравните значения емкостей параллельного и последовательного соединений конденсаторов — значения, полученные опытным путем и рассчитанные по теоретическим формулам (3.11) и (3.13). Если разница между теоретическими и опытными значениями емкостей параллельного и последовательного соединения конденсаторов не превышает соответствующей абсолютной погрешности, можно считать, что данный метод удовлетворительно обеспечивает проведение измерений емкостей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение емкости конденсатора. От чего зависит емкость конденсатора?

2. Объясните по схеме цепи назначение используемых приборов.
3. Подробно объясните принцип определения емкости в данной работе.
4. Выведите расчетные формулы для определения емкостей C_x , $C_{\text{пар}}$, $C_{\text{пос}}$.
5. Каковы единицы измерения емкости?
6. Изобразите схемы параллельного и последовательного соединений конденсаторов. Запишите формулы для результирующих емкостей.
7. Выведите формулы для расчета погрешностей ΔC_x , $\Delta C_{\text{пар}}$, $\Delta C_{\text{пос}}$.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ИСТОЧНИКА ТОКА

Цель работы: изучение законов постоянного электрического тока и ознакомление с компенсационным методом измерения электродвижущей силы источника тока.

Краткая теория:

Электродвижущей силой (ЭДС) источника тока называется скалярная физическая величина, являющая его энергетической характеристикой и измеряемая работой сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда по участку цепи или замкнутой цепи. Электродвижущая сила источника тока численно равна разности потенциалов между его полюсами при условии отсутствия в нем электрического тока.

Измерение ЭДС при помощи вольтметра, имеющего малое входное сопротивление, является приближенным, так как при этом через вольтметр и источник протекает существенной величины ток. Реально источники тока не идеальные, обладают внутренним сопротивлением. Показания вольтметра, равные падению напряжения на входном сопротивлении прибора, меньше величины ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

Поэтому, для измерения ЭДС источника следует использовать цифровые вольтметры, имеющие малые входные токи, или компенсационный метод измерения.

Наиболее точным является *компенсационный метод*. В этом методе точно такая же разность потенциалов, численно равная неизвестной ЭДС E_x источника, в отсутствии тока в нем, создается во внешней цепи как падение напряжения при протекании тока в реохорде. В последствие эти величины сравниваются. При условии их равенства говорят, что неизвестная ЭДС E_x компенсируется известной разностью потенциалов. При этом ток через источник E_x отсут-

ствуется и неизвестная ЭДС равна компенсирующей разности потенциалов. Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 4.1.

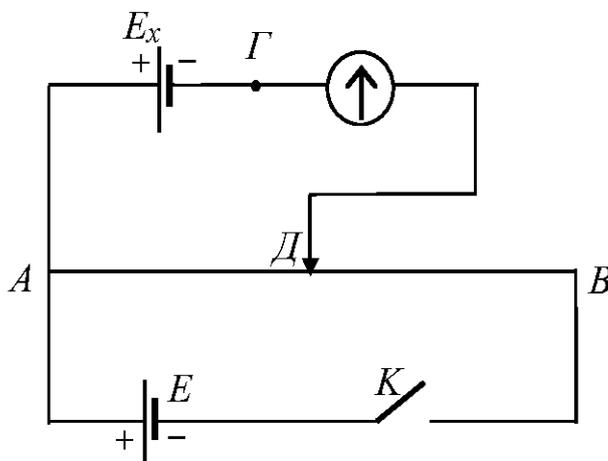


Рис. 4.1. Принципиальная схема электрической цепи компенсационного метода измерения ЭДС источника тока

К реохорду AB , имеющему движок D , присоединена батарея аккумуляторов E . Ток батареи, протекая по проволоке реохорда, создает на ней разность потенциалов $\Delta\varphi_{AB} = U_{AB} = I \cdot R_{AB}$. На участке AD также создается разность потенциалов, равная напряжению на этом участке, величину которой можно изменять, передвигая движок от нуля (точка A) до максимума (точка B).

Такой способ измерения разности потенциалов называется *потенциометрическим*, а сам реохорд, включенный таким образом, называется *потенциометром*.

К точкам A и D присоединяются полюса источника тока с неизвестной ЭДС E_x через гальванометр или измеритель разности потенциалов. В данной работе в качестве измерителя разности потенциалов используется цифровой вольтметр. При этом к точке A подключаются одноименные полюса источников E и E_x . При замкнутом ключе K можно найти такое положение движка на реохорде, при котором стрелка гальванометра не отклоняется и ток на участке AE_xD отсутствует. В этом случае разность потенциалов между точками D и Γ

равна нулю, и ЭДС источника E_x компенсируется падением напряжения на участке AD реохорда.

По закону Ома можно записать

$$E_x = U_{1AD} = I \cdot R_{1AD}, \quad (4.1)$$

где I — сила тока в цепи батареи E ;

R_{1AD} — сопротивление участка AD реохорда, при котором компенсируется ЭДС E_x .

Измерение силы тока I можно не проводить, так как при этом вносятся дополнительные погрешности, а использовать калибровочный опыт и элемент с известной ЭДС. Для этого вместо источника E_x нужно включить элемент с известной ЭДС E_0 и найти новое положение движка D , при котором ток в цепи гальванометра отсутствует.

При этом условии аналогично выражению (4.1) можно записать

$$E_0 = U_{2AD} = I \cdot R_{2AD}, \quad (4.2)$$

где R_{2AD} — сопротивление участка AD , при котором компенсируется ЭДС E_0 .

Если ток через гальванометр отсутствует, ток в цепи источника E будет одинаковым, независимо от положения движка реохорда. Тогда, разделив друг на друга выражения (4.1) и (4.2), получаем

$$\frac{E_x}{E_0} = \frac{R_{1AD}}{R_{2AD}}. \quad (4.3)$$

Сопротивления R_{1AD} и R_{2AD} пропорциональны длинам участков реохорда l_x и l_0 , соответственно для неизвестного и известного источников, от его общего конца A до подвижного контакта D , поэтому

$$\frac{E_x}{E_0} = \frac{\ell_x}{\ell_0}. \quad (4.4)$$

Отсюда окончательно имеем

$$E_x = E_0 \frac{\ell_x}{\ell_0}. \quad (4.5)$$

При проведении опыта нужно иметь в виду, что E должна быть постоянной и больше по величине, чем E_0 и E_x , так как только в этом случае возможно найти на реохорде такое положение движка D , при котором можно осуществить компенсацию. Цепь следует замыкать на короткое время, чтобы обнаружить наличие или отсутствие тока через гальванометр, иначе может происходить нагревание проводников, изменяющее их сопротивление. В данной работе известную величину ЭДС (как и неизвестную — для сравнения) следует измерять с помощью цифрового вольтметра, у которого входной ток ничтожно мал и не превышает 10 мкА.

Компенсационный метод измерения разности потенциалов применяется в полевом электроразведочном потенциометре, электрическая схема которого приведена на рис. 4.2. Если разность потенциалов на участке эталонного сопротивления R (потенциометра) между точками m и n полностью компенсирует разность потенциалов между заземленными электродами M и N , ток через гальванометр будет равен нулю. Потенциометр снабжен шкалой, по которой непосредственно отсчитывается значение измеряемого напряжения.

В геофизике применяется прибор, называемый *электроразведочный автокомпенсатор*, в котором компенсирующая разность потенциалов создается автоматически при помощи электронной схемы. Он позволяет легко производить измерения силы тока в питающей цепи и разности потенциалов между приемными электродами.

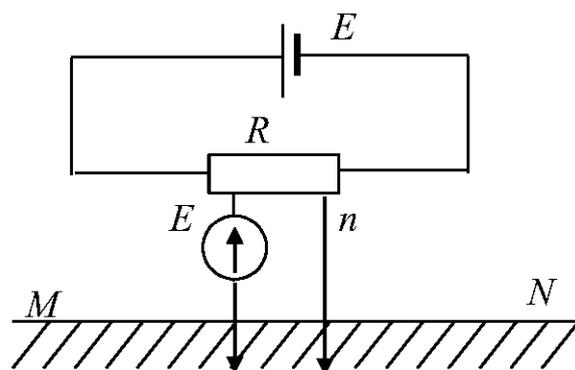


Рис. 4.2. Схема цепи полевого электроразвездочного потенциометра

Выполнение работы:

Необходимые приборы: круговой реохорд, цифровой вольтметр, переключатель S_1 , набор сопротивлений R_1, R_2, R_3 , предназначенных для изменения силы тока через реохорд, источник E постоянного напряжения, источник E_x с неизвестной ЭДС, источник E_0 с известной ЭДС. Все элементы схемы, кроме цифрового вольтметра, собраны внутри лабораторного стенда.

Рабочая схема опыта показана на рис. 4.3 и на панели стенда.

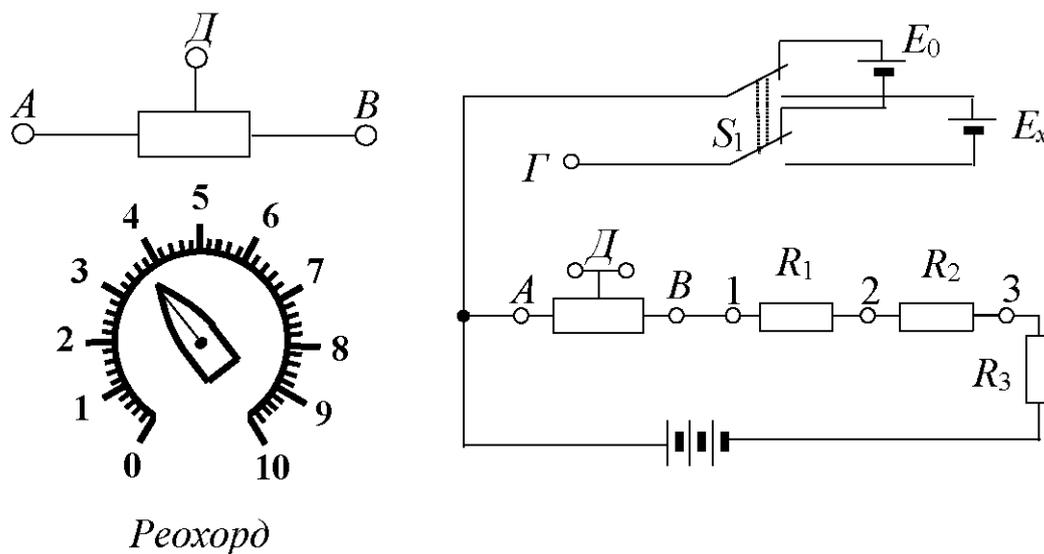


Рис. 4.3. Рабочая схема опыта

Порядок выполнения работы:

1. Подготовьте к работе цифровой вольтметр в соответствии с инструкцией по эксплуатации, находящейся на лабораторном столе.
2. Подключите вольтметр к клеммам Γ и Δ .
3. Реохорд включите в цепь с помощью перемычек (соедините попарно клеммы AA , DD и BB на реохорде и в измерительной цепи).
4. Включите лабораторный стенд тумблером, расположенным в левой части передней стенки.
5. Перемычкой закоротите сопротивления R_1 и R_2 , оставив включенным сопротивление R_3 (соедините клеммы 1 – 3).
6. С помощью переключателя S_1 включите источник с неизвестной ЭДС E_x (перевести переключатель в *нижнее* положение).
7. Вращением ручки кругового реохорда добейтесь нулевого показания вольтметра. Отсчитайте по шкале реохорда от нуля до стрелки длину левого ℓ_x плеча AD и запишите ее в табл. 4.1.
8. С помощью переключателя S_1 включите источник с известной ЭДС E_0 (перевести переключатель в *верхнее* положение).
9. Добейтесь нулевого показания вольтметра и определите длину левого ℓ_0 плеча AD кругового реохорда.
10. Для второго опыта закоротите перемычкой только сопротивление R_1 (соедините клеммы 1 – 2), оставив включенными (R_3+R_2) , и повторите пункты 6 – 9 для каждого из источников E_x и E_0 .
11. Третий опыт проводится при сопротивлениях $(R_1+R_2+R_3)$, для чего перемычка убирается совсем. Результаты запишите в табл. 4.1.
12. Измерьте цифровым вольтметром ЭДС известного E_0 и неизвестного E_x источников. Для этого подключите вольтметр к клеммам A и Γ . Источники переключаются тумблером S_1 . Показания вольтметра запишите под табл.

Результаты измерений

$R_{\text{н}}$	l_x , дел. шкалы	l_0 дел. шкалы	E_x , В	ΔE_x , В
R_3				
R_3+R_2				
$R_1+R_2+R_3$				
Средние значения			$\bar{E}_x =$	$\Delta \bar{E}_x =$

Во всех трех случаях вычислите ЭДС неизвестного элемента E_x по формуле (4.5). Определите среднее значение E_x , средние абсолютную и относительную погрешности. Окончательный результат запишите в виде

$$E_x = \bar{E}_x \pm \Delta \bar{E}_x. \quad (4.6)$$

Сравните значение ЭДС неизвестного источника тока, определенного методом компенсации, со значением, измеренным с помощью цифрового вольтметра.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется электродвижущей силой источника тока?
2. Что такое сторонние силы?
3. Назовите способы измерения ЭДС.
4. Какова природа ошибки, допускаемой при измерении ЭДС источника тока с помощью вольтметра?
5. В чем заключается метод компенсации, и каковы его достоинства?

6. Приведите принципиальную схему электрической цепи для измерения ЭДС методом компенсации. Поясните порядок проведения измерений.

7. Выведите расчетную формулу для определения E_x .

8. Какому условию должна удовлетворять в этой установке величина ЭДС источника тока E , служащего для питания цепи?

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ

Цель работы: изучение законов постоянного тока на примере классического метода измерения сопротивления проводников с помощью мостовой схемы и определение удельного сопротивления материала проводника.

Краткая теория:

Электрическое сопротивление проводника — это скалярная физическая величина, характеризующая свойства проводника препятствовать протеканию электрического тока. Сопротивление проводника зависит от его формы, размеров и электропроводящих свойств материала, из которого изготовлен проводник.

Сопротивление однородного проводника с постоянным поперечным сечением определяется по формуле

$$R = \rho \frac{\ell}{S}, \quad (5.1)$$

где ρ — удельное сопротивление материала проводника;

ℓ — длина проводника;

S — площадь поперечного сечения.

Из формулы (5.1) можно выразить удельное сопротивление:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{\ell}. \quad (5.2)$$

Удельное сопротивление численно равно сопротивлению проводника единичной длины, имеющего единичную площадь поперечного сечения. В системе СИ удельное сопротивление измеряют в омах-метрах $[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$.

Одним из методов измерения сопротивления является *метод моста Уитстона*.

Мост Уитстона состоит из четырех сопротивлений – плеч R_X , R_H , R_{AD} , R_{DB} , которые соединены между собой так, что образуют замкнутый четырехугольник. К двум противоположным его углам (в диагональ) A и B подключают полюса источника постоянного тока E , а к двум другим C и D — чувствительный гальванометр или измеритель разности потенциалов (в данной работе вольтметр).

Принципиальная схема моста Уитстона изображена на рис. 5.1.

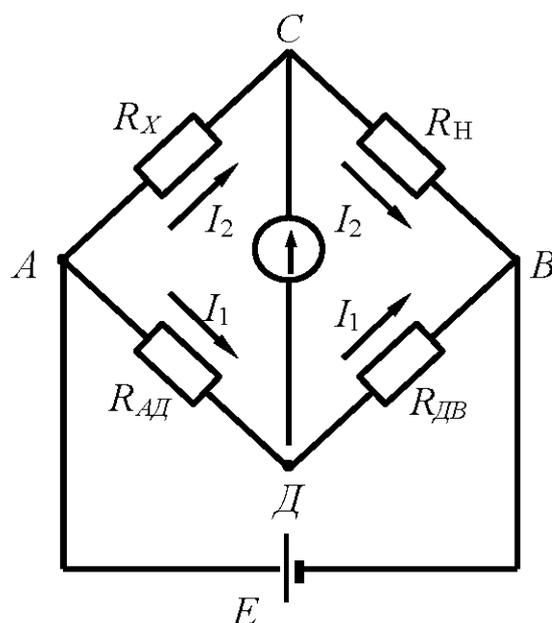


Рис. 5.1. Принципиальная схема моста Уитстона

Если мост подключен к источнику E , по участку моста CD , вследствие неравенства потенциалов точек C и D , может протекать электрический ток и стрелка гальванометра отклонится. Для того, чтобы на участке CD ток отсутствовал, необходимо создать равенство потенциалов точек C и D (условие равновесия моста).

Изменять разность потенциалов между точками C и D можно таким способом: в качестве участка ADB включается калиброванная проволока (реохорд) со скользящим контактом D . Реохорд снабжен

шкалой. Перемещая движок реохорда, можно добиться отсутствия тока на участке CD , что будет зарегистрировано прибором. Обозначим силу тока, текущего на участке ADB , через I_1 , а на участке ACB — через I_2 . Для каждого плеча реохорда запишем уравнения по закону Ома:

$$\begin{aligned} \varphi_A - \varphi_C &= R_x \cdot I_2, & \varphi_C - \varphi_B &= R_H \cdot I_2, \\ \varphi_A - \varphi_D &= R_{AD} \cdot I_1, & \varphi_D - \varphi_B &= R_{DB} \cdot I_1, \end{aligned} \quad (5.3)$$

где $\varphi_A, \varphi_C, \varphi_B, \varphi_D$ — потенциалы точек A, C, B, D соответственно.

При отсутствии тока через гальванометр $\varphi_C = \varphi_D$. Следовательно, можно записать:

$$R_x \cdot I_2 = R_{AD} I_1, \quad R_H \cdot I_2 = R_{DB} I_1. \quad (5.4)$$

Составив пропорцию, получим

$$\frac{R_x}{R_H} = \frac{R_{AD}}{R_{DB}}. \quad (5.5)$$

Так как проволока, из которой изготовлен реохорд ADB , однородна и имеет по всей длине одинаковое сечение, то сопротивления R_{AD} и R_{DB} пропорциональны соответствующим длинам плеч ℓ_1 и ℓ_2 реохорда. Поэтому (5.5) можно переписать в виде

$$\frac{R_x}{R_H} = \frac{\ell_1}{\ell_2}, \quad (5.6)$$

откуда неизвестное сопротивление:

$$R_x = R_H \frac{\ell_1}{\ell_2}. \quad (5.7)$$

Таким образом, условие равновесия моста определяется только соотношением плеч реохорда и не зависит от электродвижущей силы источника тока, питающего цепь.

С другой стороны, сопротивление проводника можно выразить, зная его форму, размер и материал, из которого он изготовлен:

$$R_x = \rho \frac{\ell}{S} = \rho \frac{4\ell}{\pi d^2}, \quad (5.8)$$

где d — диаметр проводника.

Отсюда удельное сопротивление исследуемого проводника:

$$\bar{\rho} = \frac{\pi d^2 R_x}{4\ell}. \quad (5.9)$$

В табл. 5.1 приведены значения удельного сопротивления некоторых проводников при комнатной температуре.

Таблица 5.1

Значения удельного сопротивления проводников

Материал проводника	$\rho, 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$
Серебро	0,016
Медь	0,017
Алюминий	0,028
Вольфрам	0,055

Материал проводника	ρ , 10^{-6} Ом·м
Цинк	0,060
Латунь	0,071
Свинец	0,120
Никелин	0,420
Манганин	0,459
Константан	0,500
Ртуть	0,958
Нихром	1,100

Удельное сопротивление горных пород изменяется в широких пределах. Наиболее низкое удельное сопротивление имеют самородные металлы: золото, платина, серебро, медь. Наиболее распространенные минералы (кварц, полевой шпат, слюда, каменная соль) имеют удельное сопротивление $10^{10} \div 10^{14}$ Ом·м. Они являются хорошими изоляторами.

Горные породы в условиях естественного залегания содержат в порах и трещинах токопроводящие минерализованные или пресные воды, иногда нефть и газы. Поэтому удельное сопротивление пород зависит не только от удельного сопротивления минералов, их составляющих, но и от степени трещиноватости, а также от удельного сопротивления жидкостей и газов, заполняющих поры.

Это обстоятельство позволяет по данным измерений удельного сопротивления выделять в разрезах скважин коллекторы, содержащие воду, газ и нефть, определять пористость пород и нефтегазонасыщенность. Данные этого метода широко используются при подсчетах запасов нефти и газа. Весьма низкие значения удельного сопротивления многих рудных минералов и очень высокие природных солей позволяют выделять наличие этих ископаемых в разрезах скважин.

Выполнение работы:

Необходимые приборы: круговой реохорд, цифровой вольтметр, источник постоянного тока напряжением 4 В, проводник с неизвестным сопротивлением R_x (длина проводника $\ell = (20,00 \pm 0,01)$ м, диаметр проводника $d = (0,10 \pm 0,01)$ мм, набор известных сопротивлений ($R_1 = 470$ Ом, $R_2 = 680$ Ом, $R_3 = 820$ Ом). Все элементы схемы, кроме цифрового вольтметра, смонтированы внутри лабораторного стенда. Рабочая схема опыта показана на рис. 5.2 и на панели лабораторного стенда.

Порядок выполнения работы:

1. Подготовьте к работе цифровой вольтметр в соответствии с инструкцией по эксплуатации, находящейся на лабораторном столе.

2. Подключите цифровой вольтметр к клеммам C и D .

3. Включите реохорд с помощью перемычек (соедините попарно клеммы $A-A$, $D-D$, $B-B$ на реохорде и в измерительной цепи). Включите лабораторный стенд тумблером, расположенным в левой части передней стенки. С помощью перемычки закоротите сопротивления R_2 и R_3 , оставив включенным R_1 (соедините клеммы 1 – 3).

4. Вращением ручки кругового реохорда добейтесь нулевого показания вольтметра и по шкале реохорда отсчитайте длину левого плеча ℓ_1 (слева от стрелки) и правого ℓ_2 . Результаты запишите в табл. 5.2.

5. Опыт повторите еще два раза: при двух сопротивлениях ($R_1 + R_2$), для чего закоротите только сопротивление R_3 , (соедините клеммы 2 – 3) и при трех сопротивлениях ($R_1 + R_2 + R_3$), для чего перемычка убирается совсем.

По результатам измерений по формуле (5.7) три раза вычислите сопротивление исследуемого проводника, затем его среднее значение, среднюю абсолютную и среднюю относительную погрешности.

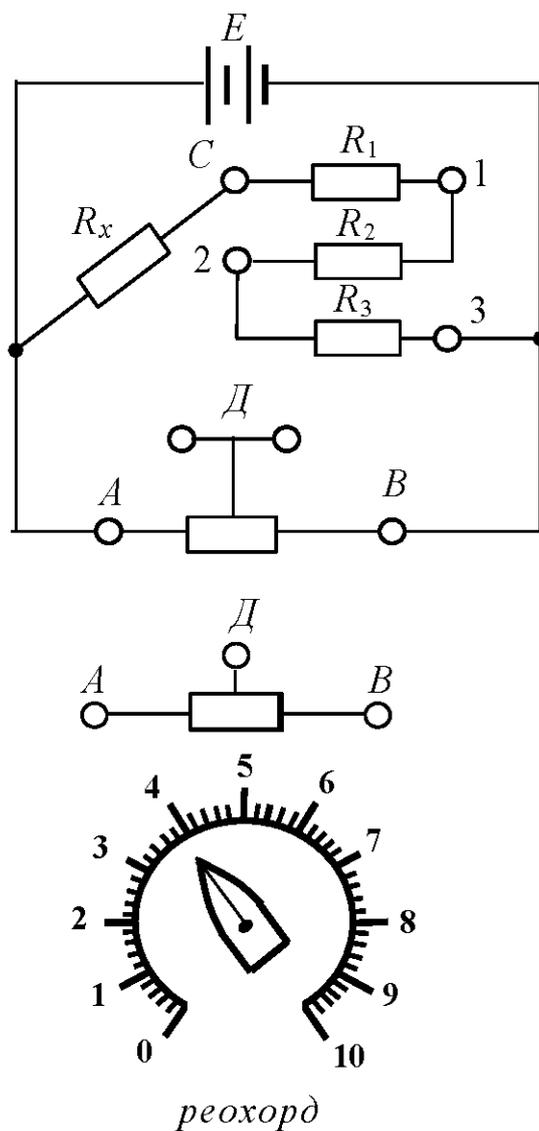


Рис. 5.2. Рабочая схема опыта

Таблица 5.2

Результаты измерений

$R_H, \text{ Ом}$	l_1	l_2	$R_x, \text{ Ом}$	$\Delta R_x, \text{ Ом}$
	деления шкалы			
$R_1 =$				
$R_1 + R_2 =$				
$R_1 + R_2 + R_3 =$				
Среднее значение			$\bar{R}_x =$	$\Delta \bar{R}_x =$

Вычислите среднее значение удельного сопротивления материала проводника по формуле (5.9). Сравнив результат с табличными значениями (см. табл. 5.1), определите материал, из которого изготовлен проводник.

Вычислите относительную и абсолютную погрешности удельного сопротивления по формулам:

$$\delta_{\rho} = \frac{\Delta\bar{\rho}}{\bar{\rho}} = 2 \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta\bar{R}_x}{\bar{R}_x} + \frac{\Delta\ell}{\ell}, \quad (5.10)$$

$$\Delta\rho = \delta_{\rho} \cdot \bar{\rho}. \quad (5.11)$$

Окончательный результат запишите в виде:

$$R_x = \bar{R}_x \pm \Delta\bar{R}_x; \quad (5.12)$$

$$\rho = \bar{\rho} \pm \Delta\bar{\rho}. \quad (5.13)$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое электрическое сопротивление проводника? От чего оно зависит?
2. Что такое удельное сопротивление проводника, в каких единицах оно измеряется?
3. От чего зависит удельное сопротивление проводника?
4. Начертите схему моста Уитстона и опишите способ измерения сопротивления с его помощью.
5. Выведите расчетную формулу для определения сопротивления неизвестного проводника.
6. Как вычисляются относительная и абсолютная погрешности измерения сопротивления R_x и удельного сопротивления ρ ?

6. СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

Цель работы: изучение законов электромагнетизма, методов исследования характеристик магнитного поля в веществе, свойств ферромагнетиков и ознакомление со способом опытного изучения магнитных свойств ферромагнетика с помощью осциллографа.

Краткая теория:

Характеристиками магнитного поля являются индукция \vec{B} и напряженность \vec{H} . Индукция является силовой характеристикой магнитного поля, численно равной величине силы, с которой магнитное поле действует на единичный элемент тока, помещенный в данную точку поля нормально линиям индукции. В веществе индукция магнитного поля определяется как макроскопическими, так и микроскопическими токами. Напряженность является вспомогательной физической величиной, характеризующей намагничивающее поле, созданное внешними (сторонними) токами.

При внесении в магнитное поле все вещества намагничиваются, т. е. магнитное поле в веществе отличается от внешнего магнитного поля. Магнитное поле в веществе можно представить в виде:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}', \quad (6.1)$$

где \vec{B} — магнитное поле в веществе;

\vec{B}_0 — внешнее магнитное поле;

\vec{B}' — внутреннее магнитное поле, возникающее за счет ориентации магнитных моментов структурных элементов вещества.

Характеристикой магнитного состояния вещества является намагниченность, численно равная суммарному магнитному моменту атомов единицы объема вещества.

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum \vec{p}_i, \quad (6.2)$$

где ΔV — физически малый объем вещества;

\vec{p}_i — магнитный момент i -го атома.

Опыт показывает, что для большинства веществ намагниченность пропорциональна напряженности намагничивающего поля.

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (6.3)$$

где χ — магнитная восприимчивость вещества, получаемая в опыте.

В веществе

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}. \quad (6.4)$$

Учитывая выражение (3), получаем:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (6.5)$$

где $\mu = \chi + 1$ — относительная магнитная проницаемость вещества, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе отличается от магнитной индукции в вакууме.

По магнитным свойствам и по характеру магнитных структур все вещества делятся на две основные группы: вещества, намагничивающиеся в направлении, противоположном направлению внешнего магнитного поля, и вещества, намагничивающиеся в направлении внешнего магнитного поля.

Диамагнетики — вещества, намагничивающиеся в направлении, противоположном направлению намагничивающего поля. Для диамагнетиков $\chi < 0$, следовательно, $\mu < 1$. Диамагнитными свойствами обладают вещества, собственные магнитные моменты структурных элементов которых равны нулю в отсутствие внешнего поля. Во

внешнем магнитном поле в атомах индуцируются магнитные моменты, ориентированные противоположно намагничивающему полю.

Структурные элементы веществ, намагничивающихся в направлении внешнего магнитного поля, обладают собственными магнитными моментами. Эти вещества, в свою очередь, можно разбить на две группы: вещества, не обладающие самопроизвольной ориентацией магнитных моментов структурных элементов, и вещества, у которых магнитные моменты структурных элементов упорядочены в отсутствие внешнего магнитного поля.

К первым относятся *парамагнетики*. У парамагнетиков $\chi > 0$, и соответственно, $\mu > 1$. Магнитные моменты атомов парамагнетиков в отсутствие внешнего магнитного поля разупорядочены (ориентированы в разные стороны) вследствие их теплового движения. Во внешнем магнитном поле возникает преимущественная ориентация магнитных моментов атомов парамагнетика. Магнитная восприимчивость парамагнетиков невелика и не зависит от величины напряженности намагничивающего поля.

Некоторые парамагнетики при достаточно низких температурах могут переходить в ферромагнитное или антиферромагнитное состояние.

Ко второй группе относятся ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики (ферриты).

Наибольший практический интерес представляют *ферромагнетики* — вещества, обладающие намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля. Магнитная проницаемость ферромагнетиков имеет большую величину ($\mu \gg 1$) и зависит от напряженности внешнего магнитного поля и предшествующего магнитного состояния вещества.

Для каждого ферромагнетика существует характерная температура, выше которой вещество теряет свои ферромагнитные свойства и становится парамагнетиком. Эта температура называется *точкой Кюри* T_C .

Ферромагнитными свойствами обладают железо, кобальт, никель, их сплавы, некоторые редкоземельные элементы, а также некоторые химические соединения.

Особые свойства ферромагнетиков связаны с наличием в них малых самопроизвольно намагниченных областей — магнитных доменов, размеры которых составляют несколько микрометров. В пределах одного домена магнитные моменты атомов ориентированы в одном направлении. В не намагниченном состоянии домены ориентированы хаотически и результирующая намагниченность равна нулю. Однако они имеют стремление располагаться так, чтобы образовались замкнутые магнитные цепи, так что магнитная энергия имеет наименьшую величину. Это схематически изображено на рис. 6.1, где стрелками показано направление магнитных моментов отдельных доменов.

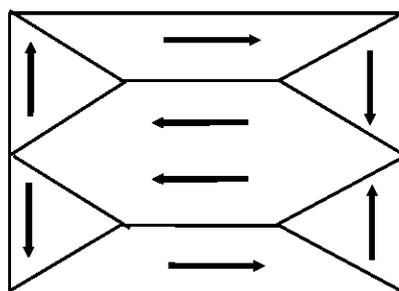


Рис. 6.1. Доменная структура ферромагнетика

Если поместить ферромагнетик во внешнее магнитное поле, он намагничивается. При малых значениях напряженности внешнего поля происходит увеличение размеров тех доменов, ориентация магнитного момента которых близка к направлению внешнего магнитного поля. Этот процесс соответствует участку OA зависимости намагниченности ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля (рис. 6.2). Если поле увеличивать (участок AB на рис. 6.2), то процесс смещения границ доменов сменяется процессом вращения. Магнитные моменты целых доменов начинают поворачиваться одновременно. Данный процесс протекает не плавно, а ступенчато, что

видно из кривой намагничивания $\vec{J}(\vec{H})$, если ее строить в увеличенном масштабе (см. рис. 6.2). При дальнейшем увеличении намагничивающего поля происходит магнитное насыщение. При этом магнитные моменты всех доменов ориентированы по полю (участок BC на рис. 6.2). Намагниченность незначительно увеличивается при увеличении поля за счет тех магнитных моментов, которые разориентированы тепловым движением. В процессе намагничивания магнитная проницаемость сначала растет, затем уменьшается и при насыщении становится близка к единице. Зависимость индукции магнитного поля (кривая намагничивания) и магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля показаны на рис. 6.3.

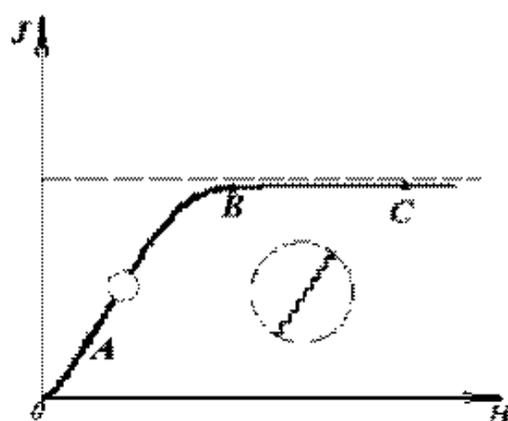


Рис. 6.2. Зависимость намагниченности ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля

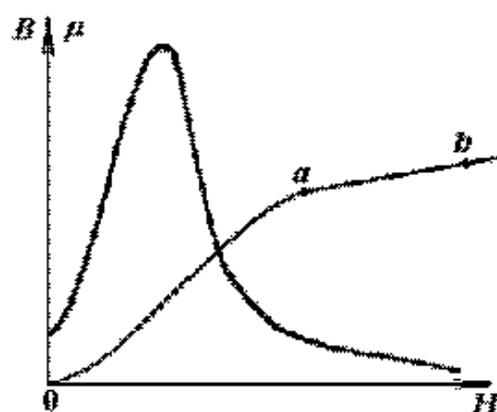


Рис. 6.3. Зависимость индукции магнитного поля в ферромагнетике и магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля

Если ферромагнетик сначала намагнитить полем напряженности H_0 до индукции B_0 , а затем уменьшать намагничивающее поле H до нуля, то индукция будет уменьшаться с некоторым отставанием (рис. 6.4). Когда напряженность станет равной нулю, индукция будет равна некоторому значению $B_{ост}$, характеризующему *остаточное намагничивание*. Наличие остаточного намагничивания объясняется тем фактом, что некоторые домены остаются ориентированными по полю и обеспечивают намагниченность ферромагнетика при нулевом намагничивающем поле.

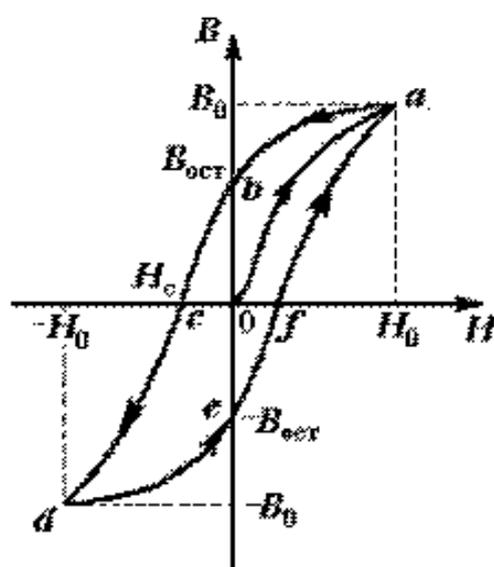


Рис. 6.4. Петля гистерезиса ферромагнетика

Явление отставания изменения индукции магнитного поля B в ферромагнетике от изменения напряженности H внешнего магнитного поля в процессе перемагничивания называется *гистерезисом*. Если увеличивать напряженность поля H в обратном направлении от нуля до некоторого значения H_c , называемого *коэрцитивной силой*, индукция поля уменьшается до нуля. При дальнейшем увеличении напряженности до $(-H_0)$ ферромагнетик перемагничивается до индукции $(-B_0)$. При изменении напряженности поля от $(-H_0)$ до нуля, вновь возникает остаточное намагничивание. Изменяя напряженность поля в первоначальном направлении до значения H_0 , снова получим значение индукции B_0 . Таким образом, при изменении напряженности от $(+H_0)$ до $(-H_0)$ и обратно, ферромагнетик пройдет полный цикл пере-

магничивания, кривая зависимости $B = f(H)$ будет иметь вид замкнутой петли, называемой *петлей гистерезиса* (см. рис. 6.4). Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, расходуемой на перемагничивание.

Чтобы размагнитить ферромагнетик, его можно поместить в переменное магнитное поле и провести несколько циклов перемагничивания, постепенно уменьшая амплитудные значения напряженности поля.

Петлю гистерезиса можно получить на экране электронно-лучевой трубки осциллографа.

Исследуемым ферромагнитным веществом является трансформаторная сталь, из которой изготовлен прямоугольный сердечник трансформатора. На сердечник намотаны две катушки: первичная — намагничивающая с числом витков N_1 и вторичная — измерительная с числом витков N_2 . Первичная катушка N_1 через эталонный резистор R_8 и потенциометр R_1 подключена к генератору переменного тока G . Для измерения амплитудного значения силы тока I_1 в первичной цепи используется электронный осциллограф ЭО, вход X которого подключается к эталонному резистору R_8 .

Принципиальная схема опыта по исследованию кривой намагничивания и петли гистерезиса ферромагнетика показана на рис. 6.5.

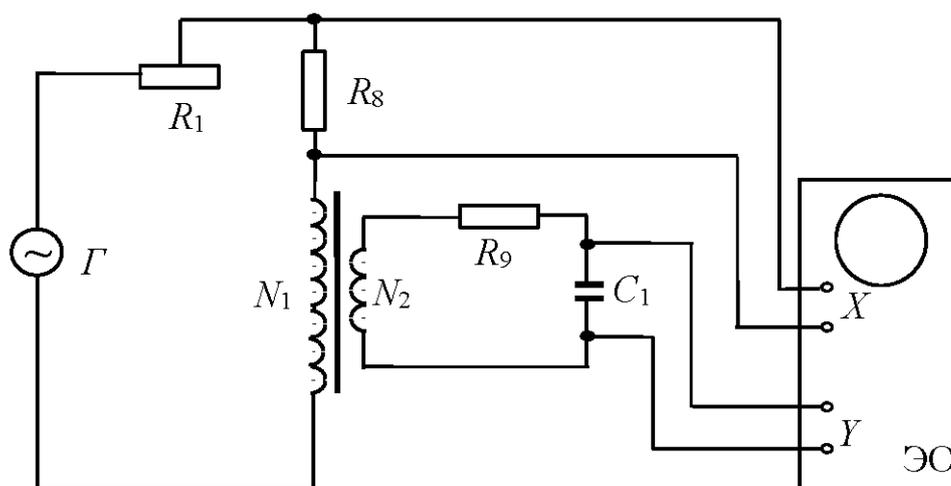


Рис. 6.5. Принципиальная схема цепи для исследования магнитных свойств ферромагнетика с помощью осциллографа

Ток I_1 создает в сердечнике намагничивающее поле напряженностью H . Напряженность магнитного поля в длинной катушке, согласно теореме о циркуляции:

$$H = \frac{I_1 N_1}{\ell}, \quad (6.6)$$

где ℓ — длина ферромагнитного сердечника.

Формула (6.6) справедлива для мгновенных значений напряженности поля и тока, а также, в частности, для амплитудных значений. Напряжение на резисторе R_8 пропорционально силе тока I_1 , а значит, и напряженности H магнитного поля.

$$U_x = I_1 \cdot R_8 = \frac{R_8 \cdot \ell}{N_1} H. \quad (6.7)$$

Таким образом, на вход X подается напряжение U_x , пропорциональное напряженности магнитного поля H .

В соответствии с законом Фарадея ЭДС взаимной индукции в измерительной катушке

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} N_2, \quad (6.8)$$

где Φ — магнитный поток, сцепленный с каждым витком катушек N_1 и N_2 .

По определению

$$\Phi = B \cdot S, \quad (6.9)$$

где S — площадь одного витка.

Тогда

$$\varepsilon = -SN_2 \frac{dB}{dt}. \quad (6.10)$$

Так как ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитной индукции, то для определения величины B во вторичную цепь включено интегрирующее устройство. Функцию последнего выполняет интегрирующая цепочка, состоящая из резистора R_9 и конденсатора C_1 . Можно показать, что напряжение на конденсаторе пропорционально интегралу от силы тока во вторичной катушке I_2 .

$$U_C = \frac{1}{C_1} \int_0^{t_1} I_2 dt, \quad (6.11)$$

где t_1 — время интегрирования, соизмеримое с периодом колебания тока промышленной сети.

Для интегрирующего звена омическое сопротивление обычно выбирается значительно бóльшим емкостного сопротивления $X_C = 1/\omega C$ (где ω — круговая частота). В этом случае сила тока I_2 практически полностью определяется величиной R_9 и по закону Ома

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_9}. \quad (6.12)$$

Из формулы (6.11) с учетом выражений (6.12) и (6.10) получаем, что напряжение на конденсаторе

$$U_C = \frac{1}{C_1} \int_0^{t_1} \frac{\varepsilon}{R_9} dt = -\frac{SN_2}{C_1 R_9} \int_0^{t_1} \frac{dB}{dt} dt = -\frac{SN_2}{C_1 R_9} B, \quad (6.13)$$

и, следовательно, магнитная индукция

$$B = \frac{C_1 R_9}{S N_2} U_C. \quad (6.14)$$

Таким образом, напряжение, снимаемое с конденсатора и подаваемое на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ осциллографа (вход Y), пропорционально индукции магнитного поля в сердечнике. Если увеличивать силу тока в первичной катушке, площадь петли гистерезиса будет сначала увеличиваться. Таким образом, будут наблюдаться частные петли гистерезиса. При некотором значении силы тока, дальнейшего увеличения площади петли происходить не будет. Наибольшая по площади петля гистерезиса будет являться предельной.

По известным значениям B и H можно вычислить магнитную проницаемость трансформаторной стали:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (6.15)$$

В эксперименте предлагается оценить также мощность, затраченную на перемагничивание материала. При перемагничивании образца энергия расходуется на переориентацию доменов и выделяется в виде тепла. Величина этой энергии W , приходящейся на единицу объема образца, численно равна площади S_1 петли гистерезиса.

Если частота переменного тока ν , то количество тепла, выделяемое за единицу времени, будет равно мощности, затрачиваемой на перемагничивание единицы объема:

$$P = W \cdot \nu = S_1 \nu. \quad (6.16)$$

Площадь петли гистерезиса определяем по числу клеток, занимаемых ею на экране осциллографа. Если цена деления по оси H равна Z_H , а по оси $B - Z_B$, тогда величина площади петли будет

$$S_1 = N \cdot Z_H \cdot Z_B,$$

где N — площадь петли в малых делениях шкалы осциллографа.

Потери на перемагничивание, следовательно, будут

$$P = N \cdot Z_H \cdot Z_B \cdot \nu. \quad (6.17)$$

В данной работе частота переменного тока равна частоте в промышленных сетях $\nu = 50$ Гц.

Выполнение работы:

Необходимые приборы и материалы: ферромагнитный сердечник с катушками N_1 и N_2 ($N_1 = 2\,000$, $N_2 = 1\,000$ витков, $l = 0,1$ м, $S = 1 \cdot 10^{-4}$ м²); резистор R_8 ; генератор переменного тока G ; электронный осциллограф ЭО; интегрирующая цепь R_9, C_1 ($R_9 = 160$ кОм, $C_1 = 3,9$ мкФ). Все элементы схемы, кроме осциллографа, смонтированы внутри лабораторного стенда. Рабочая схема опыта для исследования кривой намагничивания и петли гистерезиса ферромагнетика показана на рис. 6.6 и на панели стенда.

Порядок выполнения работы:

1. Соберите схему согласно рис. 6.6, подключив вход OX осциллографа к резистору $R_8 = 10$ Ом (клеммы 1 – 2), а вход OY к конденсатору C_1 (клеммы 5 – 6). Переключатель S_2 , если он есть на стенде, должен быть в нижнем положении. Ручка потенциометра R_1 повернута до упора влево.

2. Включите лабораторный стенд тумблером, расположенным на передней стенке стенда.

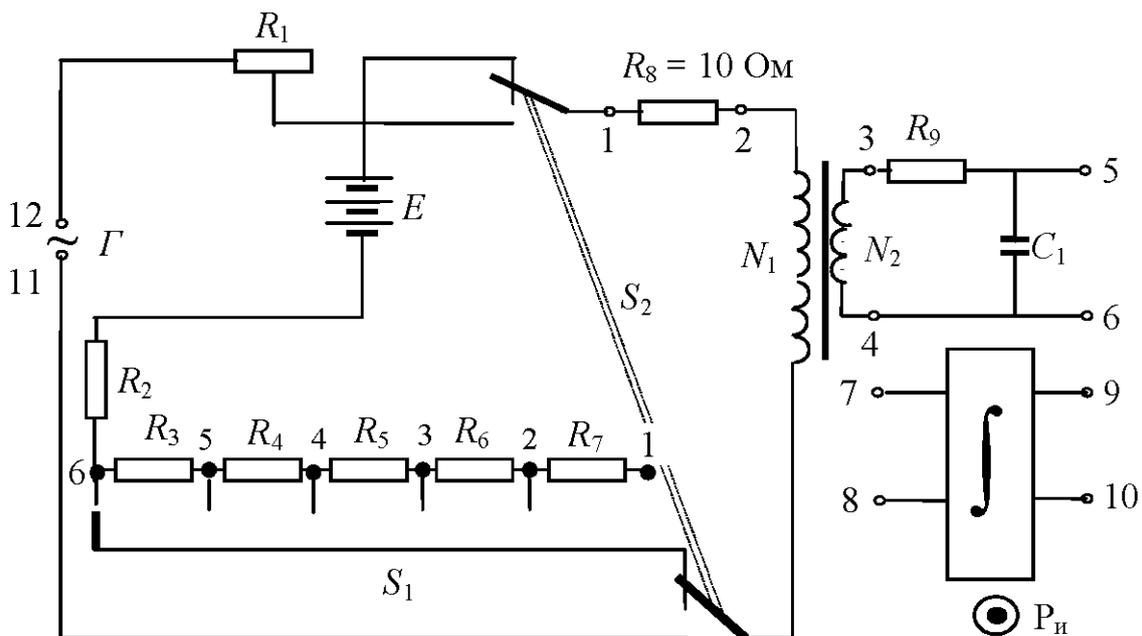


Рис. 6.6. Рабочая схема опыта

3. Включите электронный осциллограф (кнопку «питание» следует отжать). Кнопки «X – Y» слева и справа от экрана должны быть нажаты, а остальные отжаты. Вращением ручек « \leftrightarrow » и « \updownarrow » выведите изображение точки в центр экрана. Поверните ручку потенциометра R_1 до упора вправо. Ручками регулировки коэффициентов усиления первого и второго каналов добейтесь, чтобы величина максимальной петли была в пределах экрана.

Вращая ручку потенциометра R_1 , можно изменять силу тока в первичной цепи. Для каждого значения тока на экране осциллографа возникает петля гистерезиса соответствующего размера. Начиная с некоторого значения силы тока, площадь петли практически перестает возрастать, т. е. наблюдается предельная петля гистерезиса. Перед началом измерений убедитесь в этом, просматривая на экране осциллографа петли гистерезиса при различных значениях силы тока I_1 .

4. Определите цену наименьшего деления шкалы (мм) по осям OX и OY .

Для определения напряженности (H) и индукции (B) магнитного поля по формулам (6.6) и (6.14) необходимо измерить силу тока в первичной цепи I_1 и напряжение на конденсаторе U_c .

5. Установите на экране осциллографа предельную (максимальную) петлю гистерезиса.

6. Так как осциллографом нельзя измерить силу тока непосредственно, то силу тока определяем по закону Ома. **ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ ТОКА I_1** в первичной катушке необходимо:

а) опустите перпендикуляр из вершины петли на ось OX ;

б) полученное число маленьких делений (мм) умножьте на цену одного деления I канала, получив, тем самым *напряжение U_{R8} на резисторе R_8* ;

в) полученное значение напряжения U_{R8} , в соответствии с законом Ома, разделите на величину сопротивления ($R_8 = 10 \text{ Ом}$):

$$I_1 = U_{R8}/R_8 = U_{R8}/10.$$

Результат запишите в табл. 6.1.

7. Для определения **НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНДЕНСАТОРЕ U_c** необходимо опустить перпендикуляр из вершины петли на ось OY и полученное число маленьких делений умножить на цену одного деления II канала. Результат запишите в табл. 6.1.

8. Ручкой потенциометра R_1 уменьшайте величину силы тока таким образом, чтобы получить еще 9 петель гистерезиса, и определите для каждой петли значения силы тока I_1 и напряжения U_c (повторите пункты 6 и 7). Рекомендуется для удобства измерений уменьшать величину силы тока по оси OX на 5 маленьких делений.

9. Вычислите B , H и μ по формулам (6.6), (6.14) и (6.15).

10. Постройте графики зависимостей индукции магнитного поля B и магнитной проницаемости μ от напряженности H .

Результаты измерений

Номер опыта	Амплитудные значения		H , А/м	B , Тл	μ
	силы тока I_1 , мА	напряжения U_C , мВ			
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

11. Снова получите на экране осциллографа предельную петлю. Определите площадь предельной петли. Для этого подсчитайте количество больших клеток, охватываемых верхней половиной петли, удвойте его и умножьте на 100. Полученное число соответствует площади петли, выраженной в маленьких делениях (мм).

12. Определите координаты вершин предельной петли гистерезиса X_{\max} , Y_{\max} по экрану осциллографа в маленьких делениях. Определите цену деления Z_B и Z_H , разделив максимальные значения B и H на соответствующие координаты вершины предельной петли.

$$Z_B = \frac{B_{\max}}{Y_{\max}};$$

$$Z_H = \frac{H_{\max}}{X_{\max}}.$$

Вычислите потери на перемагничивание по формуле (6.17) в Вт/м^{-3} .

По результатам лабораторной работы сделайте выводы о характере установленных зависимостей индукции магнитного поля и магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля для исследованного ферромагнетика.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите характеристики магнитного поля и дайте их определения.
2. Назовите величины, характеризующие магнитные свойства вещества.
3. Что такое намагниченность? Что характеризует эта величина? От чего она зависит?
4. На какие группы подразделяются вещества по магнитным свойствам?
5. Назовите отличительные свойства ферромагнитных веществ.
6. Что представляет собой кривая намагничивания?
7. В чем заключается явление магнитного гистерезиса?
8. Что такое остаточная индукция и коэрцитивная сила?
9. Что представляют собой магнитные домены?
10. Опишите процесс изменения доменной структуры при намагничивании ферромагнетика.
11. Что такое магнитное насыщение?
12. Нарисуйте схему установки, поясните назначение всех элементов схемы, расскажите порядок выполнения работы.
13. Выведите расчетные формулы для определения B и H .
14. На что расходуется энергия при перемагничивании ферромагнетика?

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШКИ

Цель работы: является изучение явления электромагнитной индукции и его законов, вычисление индуктивности катушки, исследование зависимости индуктивности катушки от силы тока, протекающего по ее обмотке, ее полного и индуктивного сопротивлений от частоты переменного тока.

Краткая теория:

Всякий контур, по которому течет ток, пронизывается магнитным полем, созданным этим током. Если сила тока в контуре меняется, то изменяется и сцепленный с ним магнитный поток, поэтому вследствие явления электромагнитной индукции в контуре возникает ЭДС.

Возникновение ЭДС в контуре (катушке) при изменении силы тока в нем называется *самоиндукцией*. В соответствии с *законом Фарадея* величина ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения полного магнитного потока, пронизывающего контур (катушку):

$$\varepsilon = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (7.1)$$

где $\Psi = N \cdot \Phi$ — магнитный поток, сцепленный со всеми витками (потокосцепление).

Магнитный поток, создаваемый током, протекающим в контуре, называется *поток самоиндукции* Ψ_s . Поток самоиндукции пропорционален индукции магнитного поля, создаваемого этим током, которая, согласно закону Био — Савара — Лапласа, пропорциональна величине силы тока в контуре. Поэтому магнитный поток самоиндукции пропорционален величине силы тока:

$$\Psi_s = L \cdot I, \quad (7.2)$$

где L — индуктивность контура (катушки).

Индуктивность контура (катушки) — это скалярная физическая величина, являющаяся коэффициентом пропорциональности между магнитным потокосцеплением контура и током в нем, численно равная магнитному потокосцеплению контура при единичном токе в нем.

Индуктивность контура (а его практическая реализация — катушка) зависит от его формы, размеров и магнитной проницаемости среды. За единицу измерения индуктивности принимается 1 Гн — это индуктивность такого контура, с которым сцеплен магнитный поток в 1 Вб при силе тока в контуре, равной 1 А.

При неизменной индуктивности закон Фарадея для самоиндукции выглядит следующим образом:

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}, \quad (7.3)$$

т. е. ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре.

В соответствии с законом Фарадея можно дать другое определение индуктивности. **Индуктивность** определяется величиной ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре, при скорости изменении в нем силы тока 1 А за 1 с. Знак «минус» в формуле (7.3) отражает *правило Ленца*, согласно которому *самоиндукция противодействует всякому изменению силы тока в контуре* и представляет собой аналогию с инерцией в механике.

В электрической цепи наличие индуктивности приводит к возникновению добавочного индуктивного сопротивления катушки переменному току:

$$X_L = 2\pi\nu L, \quad (7.4)$$

где ν — частота переменного тока.

Модуль полного сопротивления Z катушки, выраженного из закона Ома:

$$Z = \frac{U}{I}, \quad (7.5)$$

где U и I — эффективные значения напряжения и силы тока в катушке.

С другой стороны, полное сопротивление катушки Z определяется по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (7.6)$$

где R — омическое или активное сопротивление катушки постоянному току;

X_L — индуктивное сопротивление катушки переменному току.

С учетом сопротивления (7.4), получим выражение:

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi\nu L)^2}, \quad (7.7)$$

из которого можно выразить индуктивность катушки L :

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi\nu} = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}. \quad (7.8)$$

Соотношение (7.8) лежит в основе опыта по определению индуктивности. Для того чтобы определить индуктивность, необходимо измерить частоту переменного тока, действующее значение силы переменного тока, протекающего через катушку, действующее значения напряжения на катушке и омическое сопротивление катушки.

Индуктивность длинного соленоида с сердечником может быть рассчитана по формуле

$$L_C = \mu \mu_0 n^2 V, \quad (7.9)$$

где μ — магнитная проницаемость сердечника;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная;

n — число витков, приходящихся на единицу длины катушки;

V — объем катушки.

Измеряя индуктивность катушки, можно определять магнитную проницаемость материала, из которого изготовлен сердечник. В частности, таким способом можно определять магнитную проницаемость горных пород.

Выполнение работы:

Необходимые приборы: лабораторный стенд, внутри которого смонтированы все элементы схемы; генератор периодических сигналов; цифровой вольтметр. Рабочая схема опыта показана на рис. 7.1 и на панели стенда.

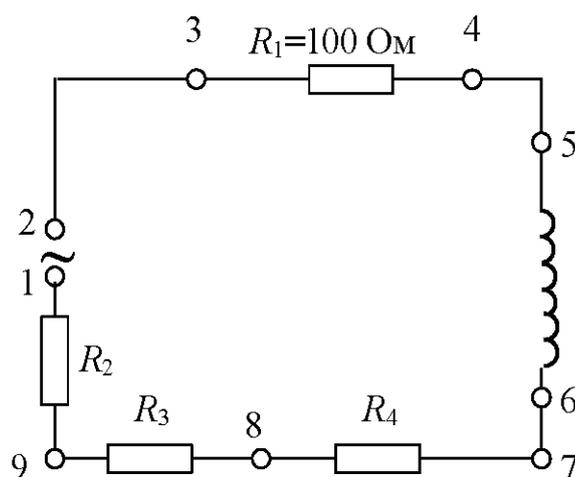


Рис. 7.1. Рабочая схема опыта

Порядок выполнения работы:

Для того, чтобы вычислить индуктивность катушки по формуле (7.8), необходимо знать четыре параметра: R (омическое сопротивление обмотки катушки), ν (частоту переменного тока), U (напряжение на катушке) и I (силу тока в катушке).

1. Подготовьте к работе универсальный вольтметр и генератор периодических сигналов.

2. Определите *омическое сопротивление* обмотки катушки R . Для этого подключите универсальный вольтметр к клеммам 5 – 6. Запишите в табл. 7.1 значение омического сопротивления катушки, снятое с табло вольтметра.

3. Подготовьте вольтметр к последующим измерениям, для чего переведите его в режим измерения эффективных значений переменных напряжений.

4. Подключите к клеммам 1 – 2 генератор сигналов (регулятор уровня сигнала должен быть в крайнем правом положении). Установите вращением ручки «ЧАСТОТА» *частоту* генерируемого сигнала 10 кГц. Запишите ее в табл. 7.1.

5. *Сила тока I* в катушке рассчитывается по закону Ома для участка цепи 3 – 4 резистора, включенного последовательно с катушкой. Для этого необходимо:

а) измерить *напряжение на резисторе R_1* . Для этого подключите вольтметр к клеммам 3 – 4, (никуда не записывать);

б) величину *этого* напряжения, согласно закону Ома, делим на сопротивление резистора $R_1 = 100 \text{ Ом}$:

$$I = \frac{U_{R_1}}{R} = \frac{U_{R_1}}{100}.$$

Результат запишите в табл. 7.1.

6. *Напряжения на катушке U* измерьте, подключив вольтметр к клеммам 5 – 6. Результат запишите в табл. 7.1.

7. Для второго и третьего опыта измените значения силы тока в цепи. Для второго опыта исключите из цепи сопротивления R_2 и R_3 , для чего подключите генератор к клеммам 2 – 8. Повторите пункты 5, 6.

8. Для третьего опыта исключите все три сопротивления R_2 , R_3 и R_4 , подключив генератор к клемма 2 – 7. Повторите пункты 5, 6.

По данным измерений рассчитайте три значения индуктивности катушки по формуле (7.8), подставляя значение частоты генератора 10 кГц.

Таблица 7.1

Результаты измерений

Номер опыта	U , В	I , мА	L , Гн
1			
2			
3			
Частота переменного тока $\nu = 10$ кГц			
Омическое сопротивление катушки $R =$			

В работе также исследуется зависимость индуктивности катушки L , ее индуктивного X_L и модуля полных сопротивлений Z от частоты переменного тока при неизменной величине силы тока.

9. Подключите генератор к клеммам 1 – 2 и установите частоту $\nu = 20$ кГц.

10. Измерьте напряжение и силу тока согласно пунктам 5, 6. Запишите в табл. 7.2.

11. Установите следующую частоту, приведенную в табл. 7.2, $\nu = 10$ кГц.

12. Подключите вольтметр к резистору, как указано в п. 5. **РУЧКОЙ ГЕНЕРАТОРА «УРОВЕНЬ» ДОБЕЙТЕСЬ ПЕРВО-**

НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ ТОКА В ЦЕПИ (какой был при $\nu = 20$ кГц).

13. Измерьте напряжение на катушке согласно пункту 6.

14. Опыт повторите при других значениях частоты ν , приведенных в табл. 7.2, **КАЖДЫЙ РАЗ УСТАНАВЛИВАЯ С ПОМОЩЬЮ РЕГУЛЯТОРА «УРОВЕНЬ» ПЕРВОНАЧАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ ТОКА.**

15. Рассчитайте в каждом случае величину индуктивности L , индуктивного X_L и полного Z сопротивлений катушки. По результатам измерений постройте графики зависимости полного Z и индуктивного X_L сопротивлений от частоты ν .

Вычислите среднее значение индуктивности и среднюю абсолютную погрешность. Результат запишите в виде

$$\bar{L} = \bar{L} \pm \Delta\bar{L}. \quad (7.10)$$

Таблица 7.2

Результаты измерений

Номер опыта	ν , кГц	I , мА	U , В	Z , Ом	X_L , Ом	L , Гн	ΔL , Гн
1	20						
2	10						
3	5						
4	2						
5	1						
Средние значения						\bar{L}	$\Delta\bar{L}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление самоиндукции?
2. Что называется индуктивностью и в каких единицах она измеряется?
3. От чего зависит индуктивность катушки?
4. Запишите формулы для индуктивного и модуля полного сопротивлений катушки.
5. Выведите расчетную формулу для определения индуктивности катушки.
6. Как зависит модуль полного сопротивления катушки от частоты изменения тока в ней?
7. Какое влияние оказывает наличие сердечника в катушке на величину силы тока в ней при переменном и постоянном токах?

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иродов И. Е.* Основные законы электромагнетизма. — Москва : Высшая школа, 1983. — С. 51–54 с.
2. *Калашиников С. Г.* Электричество. — Москва : Наука, 1970. — С. 77–91.
3. *Савельев И. В.* Курс общей физики. Т. 2. — Москва : Наука, 1982. — С. 87–89.
4. *Физический практикум. Электричество и оптика* / под ред. В. И. Ивероновой. — Москва : Наука, 1968. — 815 с.
5. *Детлаф А. А., Яворский Б. М.* Курс физики. Т. 2. — Москва : Высшая школа, 1977. — 376 с.
6. *Зисман Г. А., Тодес О. М.* Курс общей физики. Т. 2. — Москва : Наука, 1974. — 336 с.
7. *Трофимова Т. И.* Курс общей физики : учеб. пособие для вузов. — Москва : Высшая школа, 1985. — С. 203–213.