

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

О.И. Наслузова, И.В. Серюкова

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Методические указания

Электронное издание

Красноярск 2016

Рецензент

*С.В. Мисюль, д-р физ.-мат. наук, проф. каф. физики твердого тела
и нанотехнологий Сибирского федерального университета*

Наслузова, О.И.

Физические принципы электрооборудования: методические указания / О.И. Наслузова, И.В. Серюкова; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2016. – 75 с.

Представлены темы лабораторных работ по курсу «Физические принципы электрооборудования» и рекомендации по их выполнению, список литературы.

Предназначено для бакалавров Института энергетики и управления энергетическими ресурсами по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» по профилю «Электрооборудование и электротехнологии в АПК».

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Красноярского государственного аграрного университета

© Наслузова О.И., Серюкова И.В., 2016
© ФГБОУ ВО «Красноярский государственный
аграрный университет», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
ЧАСТЬ 1. ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА	7
Тема 1.1. Законы Ома. Закон Джоуля-Ленца	7
Лабораторная работа № 1.1.1. Проверка закона Ома.....	12
Лабораторная работа № 1.1.2. Сопротивление параллельного и последовательного соединения резисторов	15
Лабораторная работа № 1.1.3. Определение зависимости сопротивления металлического проводника от его длины при помощи мостика постоянного тока (мостика Уитстона)	18
Тема 1.2. Виды подключения элементов схем и приборов в электрической цепи	23
Лабораторная работа № 1.2.1. Стандартные обозначения элементов электрических схем. Проектировка и сбор электрических цепей.....	27
Лабораторная работа № 1.2.2. Изучение видов подключения реостата	30
ЧАСТЬ 2. МАГНИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.....	33
Тема 2.1. Магнитное поле в вакууме	33
Лабораторная работа № 2.1.1. Электроизмерительные приборы	37
Тема 2.2. Электромагнитная индукция	43
Лабораторная работа № 2.2.1. Определение активного сопротивления и индуктивности соленоида	48
Лабораторная работа № 2.2.2. Измерение полного сопротивления в цепи переменного тока	52
Лабораторная работа № 2.2.3. Знакомство с принципом действия однофазного индукционного счетчика переменного тока	57
Тема 2.3. Магнитное поле в веществе	62
Лабораторная работа № 2.3.1. Изучение петли гистерезиса ферромагнетика	65
Литература	74

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Физические принципы электрооборудования» является дисциплиной по выбору и реализуется в Институте энергетики и управления энергетическими ресурсами кафедрой физики. Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с изучением основных физических явлений и принципов работы электроприборов и электрических сетей.

Целью освоения дисциплины «Физические принципы электрооборудования» является формирование у студентов научного мышления и приобретение практических навыков, необходимых для становления профессиональной компетентности бакалавра в области электрооборудования.

Задачи изучения дисциплины: формирование профессиональных компетенций путем изучения физических явлений; овладение навыками и методами физических исследований; овладение приемами и методами решения практических задач; ознакомление с современной научной аппаратурой.

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать

- статистические методы обработки экспериментальных данных;
- природу магнитного поля и поведение веществ в магнитном поле;
- законы электромагнитной индукции;
- основные принципы работы современных технических устройств;
- основные сведения о системах и элементах электрических систем;

уметь

- использовать физические законы при анализе и решении проблем профессиональной деятельности;
- эмпирически получать технические данные и проводить их обработку, анализировать надежность электрооборудования;
- использовать физические законы для овладения основами теории и практики электрооборудования.

владеть

- методами проведения электрических измерений;
- методами корректной оценки погрешностей при проведении эксперимента.

Студенты дневной формы обучения в течение семестра должны выполнить лабораторные работы и ответить на контрольные вопросы. Количество лабораторных работ определяется преподавателем. Студенты заочной формы обучения должны выполнить две лабораторные работы. В этих методических указаниях в конце каждой лабораторной работы приведен список контрольных вопросов, на которые надо ответить при защите темы лабораторной работы.

Для того чтобы уменьшить время, необходимое на подготовку и выполнение лабораторной работы, студент может сделать подготовку к лабораторной работе дома в рабочей тетради. Для этого нужно внимательно прочитать текст лабораторной работы, в своей рабочей тетради оформить титульный лист, записать цель работы, основные формулы для расчета величин, составить таблицу для приборов, а также таблицы для измеряемых величин и расчетов. Свою подготовку в тетрадях показать преподавателю на лабораторных занятиях и получить допуск к выполнению лабораторной работы. После выполнения лабораторной работы и защиты, дома разобрать темы, вынесенные на самостоятельную работу.

Техника безопасности при работе с электрическими цепями

Тело человека является проводником электрического тока. Ток оказывает на организм тепловое, электролитическое и биологическое действия. Тепловое действие проявляется через ожоги отдельных участков тела. Электролитическое действие выражается в разложении органической жидкости, в том числе и крови. Биологическое действие проявляется в разложении и возбуждении живых тканей организма, а также в нарушении внутренних биологических процессов, протекающих в живом организме. Для предотвращения поражения электрическим током следует соблюдать правила техники безопасности.

Правила техники безопасности

1. Включать рубильники и вилки только по разрешению преподавателя.
2. Включать схему в сеть только после ее проверки преподавателем.
3. Производить переключение схем после отключения напряжения.
4. Не прикасаться к незащищенным частям схемы, находящейся под напряжением.

5. Не оставлять без наблюдения схему, находящуюся под напряжением.

6. Все ключи и переключатели при сборке цепи должны быть разомкнуты.

7. Все реостаты, включаемые в цепь, должны быть поставлены на максимальное сопротивление.

8. Потенциометры устанавливаются при сборке цепи на нуль подаваемого в контур напряжения.

9. Цепь собирается от источника тока.

10. При разборке электрической схемы сначала отключается источник тока.

ЧАСТЬ 1. ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

Работа электрооборудования основана на двух действиях тока – тепловом и магнитном. В первой части рассматривается тепловое действие тока как основы большей части электрооборудования. На тепловом действии тока основывается работа таких приборов, как лампа накаливания, электрические нагреватели и плиты, чайники, холодильники, кондиционеры и т.д. Физические основы таких приборов основаны на законах Ома, Джоуля-Ленца и других.

ТЕМА 1.1. ЗАКОНЫ ОМА. ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов. За направление тока принимают направление движения положительных зарядов.

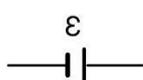
Условия существования электрического тока: а) наличие свободных зарядов; б) наличие внешнего электрического поля; в) наличие источника питания (ЭДС) в замкнутой сети.

Сила тока I в данный момент времени – скалярная физическая величина, равная первой производной по времени от заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени dt :

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad (1.1)$$

где q – заряд, прошедший через поперечное сечение проводника. Единица измерения силы тока в СИ – *ампер (А)*.

При помещении проводника во внешнее электрическое поле в нем происходит их перераспределение. Электрическое поле зарядов в проводнике быстро компенсирует внешнее поле. Заряды перестают двигаться, ток прекращается. Чтобы был ток, надо совершить работу и перенести заряды с одного конца проводника на другой. Такую работу совершает источник тока. Например, гальванический элемент (батарейка), ГЭС и т.д.



Изображение гальванического элемента на электрических схемах

ЭДС – электродвижущая сила (ε) – физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда от отрицательного полюса источника тока к положительному:

$$\varepsilon = \frac{A}{q}, \quad (1.2)$$

где A – работа, совершаемая сторонними силами. Единица измерения ЭДС – *вольт (В)*.

Сторонние силы – силы не электрического происхождения, вызывающие разделение зарядов. Например, в гальваническом элементе сторонние силы возникают за счет химической реакции между электродами и электролитом.

Напряжение (U) на участке цепи – физическая величина, численно равная суммарной работе совершаемой электростатическими и сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда на данном участке цепи:

$$U = \frac{A}{q} = \Delta\varphi + \varepsilon, \quad (1.3)$$

где $\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$ – разность потенциалов на концах проводника. Единица измерения напряжения – *вольт (В)*.

Электрическое сопротивление – физическая величина, характеризующая противодействие проводника или электрической цепи прохождению электрического тока. Различают активное и реактивное сопротивление. *Активным сопротивлением* называется такое сопротивление, при котором выделяется тепло. При *реактивном сопротивлении* тепло не выделяется. Реактивные сопротивления бывают индуктивные и емкостные, они будут изучаться во второй части этого курса.

Активное, или омическое, сопротивление (R) однородного по составу проводника с постоянным сечением S и длиной l равно

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.4)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника. Единица измерения сопротивления – *Ом*. Сопротивление проводника зависит от размеров и формы проводника. Удельное сопротивление проводника характеризует материал проводника и зависит от его температуры. Единица измерения удельного сопротивления $[\rho]$ – *Ом · м*.

Однородный участок – это участок цепи, не содержащий источника тока (ЭДС).

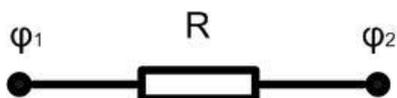


Рисунок 1.1 – Пример однородного участка цепи

Закон Ома для однородного участка цепи в интегральной форме: сила тока, текущего по однородному металлическому проводнику, пропорциональна напряжению на концах проводника и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}, \quad (1.5)$$

где φ_1 и φ_2 – потенциалы на концах участка цепи;

$\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов.

Закон Ома в дифференциальной форме для однородного участка цепи:

$$j = \gamma \bar{E}, \quad (1.6)$$

где j – плотность тока;

γ – удельная проводимость проводника;

E – вектор напряженности электрического поля.

Плотность тока – величина, равная отношению силы тока к площади поперечного сечения проводника:

$$j = \frac{I}{S}, \quad (1.7)$$

где S – площадь поперечного сечения проводника;

I – сила тока. Единица измерения плотности тока j – ампер, деленный на метр (А/м).

Удельная проводимость проводника

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \quad (1.8)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника. Единица измерения удельной проводимости γ – Сименс (См).

Неоднородный участок цепи – участок, на котором присутствует ЭДС.

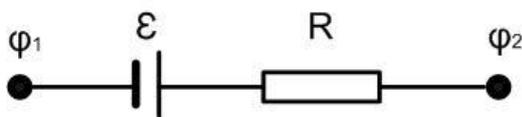


Рисунок 1.2 – Пример неоднородного участка цепи

К концам участка проводника приложена разность потенциалов

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R_{\text{внешн}} + r_{\text{внутр}}}, \quad (1.9)$$

где ε_{12} – ЭДС, действующая на участке цепи 1–2;

R – сопротивление внешней цепи по отношению к источнику тока;

r – внутреннее сопротивление источника тока.

Закон Ома для замкнутой цепи в интегральной форме:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{внешн}} + r_{\text{внутр}}}. \quad (1.10)$$

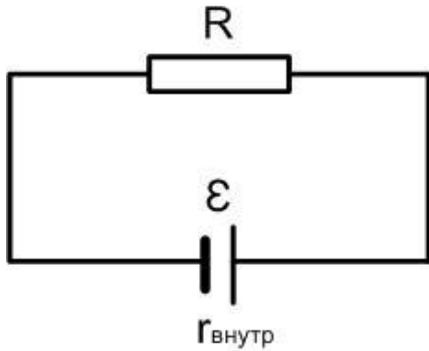


Рисунок 1.3 – Пример замкнутой цепи

Для разветвленных цепей надо использовать правила Кирхгофа. **Первое правило Кирхгофа:** алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{i=1}^n I_i = 0. \quad (1.11)$$

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда.

Второе правило Кирхгофа: в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i. \quad (1.12)$$

Второе правило Кирхгофа является обобщенным законом Ома.

Тепловое действие тока определяется законом Джоуля-Ленца.

Закон Джоуля-Ленца в интегральной форме: количество теплоты, выделяемое постоянным током на участке цепи, равно произведению квадрата силы тока на время его прохождения и электрическое сопротивление этого участка цепи. Для постоянного тока

$$Q = UIt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t. \quad (1.13)$$

Работа постоянного тока равна

$$A = Ult = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t. \quad (1.14)$$

Мощность тока равна

$$P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (1.15)$$

Внесистемная единица работы тока – *ватт·час* (*Вт·ч*). 1 *Вт·ч* – работа тока мощностью 1 *Вт* в течении часа. 1 *Вт·ч* = 3600; *Вт·с* = 3600 *Дж*. Аналогично 1 *кВт·ч* = 3600000 *Вт·с* = $3,6 \cdot 10^6$ *Дж*.

Лабораторная работа № 1.1.1 Проверка закона Ома

Цель работы: ознакомиться с методом опытного определения омического сопротивления проводника при помощи амперметра и вольтметра; измерить сопротивления резисторов при разных соединениях.

Приборы и материалы: источник постоянного тока, ключ, миллиамперметр многопредельный, вольтметр многопредельный, магазин сопротивлений, резисторы, сопротивление которых нужно определить, соединительные провода.

Экспериментальная установка

Из закона Ома для однородного участка цепи следует возможность определить сопротивление участка цепи, измерив силу тока и падение напряжения на участке цепи:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1.16)$$

Лабораторная установка для измерения сопротивления с помощью амперметра и вольтметра (рис. 1.4) состоит из источника постоянного тока ε , ключа K , миллиамперметра mA , вольтметра V , магазина

сопротивлений R , резисторов, сопротивление R_x которых нужно определить, соединительных проводов.

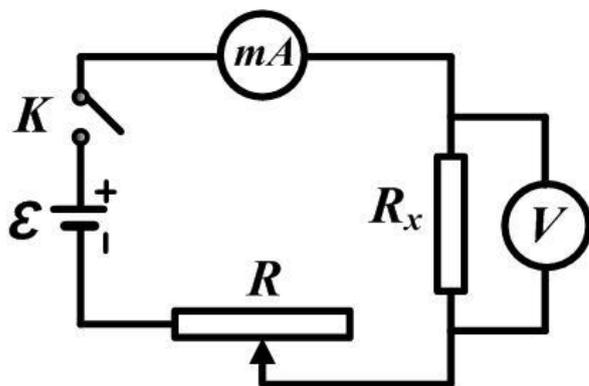


Рисунок 1.4 –
Электрическая схема для
определения сопротивления
резистора R_x .

Резисторы, сопротивления которых нужно определить, смонтированы в одной коробке. На лицевую панель коробки выведены контакты для присоединения резисторов в цепь.

Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу «Измерительные приборы» для амперметра и вольтметра.
2. Приготовьте таблицы для записи результатов измерений и расчетов.
3. Соберите цепь по схеме 1.4. Вместо R_x подключите контакты первого резистора R_1 . Замкните цепь, снимите показания амперметра и вольтметра.
4. Опыт повторите еще десять раз, меняя сопротивление на магазине сопротивлений R .
5. Результаты занесите в таблицу 1.1.
6. Постройте график зависимости силы тока I от напряжения U .
7. Ошибка измерения сопротивления R рассчитывается по методу наименьших квадратов. Вычислите величины:

$$A = I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2;$$

$$B = U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2;$$

$$C = U_1 I_1 + U_2 I_2 + \dots + U_n I_n.$$

Найдите $R = \frac{C}{A}$.

Среднеквадратичная погрешность σ_R рассчитывается по формуле

$$\sigma_R = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{AB - C^2}{(n-1)}}$$

где n – число измерений сопротивлений резистора.

Определите полуширину доверительного интервала Δ и запишите окончательный результат в виде $R_1 = (R_{1cp} \pm \Delta)$.

8. Таким же образом определите сопротивление второго резистора R_2 .

Таблица 1.1

№ п/п	Резистор 1					Резистор 2				
	I	U	R_1	R_{1cp}	ΔR_1	I	U	R_2	R_{2cp}	ΔR_2
Ед. изм.										
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

9. Запишите результаты работы и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрическое сопротивление элемента цепи? Какие бывают сопротивления?

2. Дайте определение сопротивления. Запишите формулу сопротивления однородного металлического проводника, объясните значение величин. В каких единицах измеряется сопротивление и удельное сопротивление в системе СИ?

3. Дайте определения силы тока, падения напряжения, электродвижущей силы источника тока.

4. Запишите законы Ома для однородного участка цепи, для неоднородного участка цепи, для замкнутой цепи.

5. Нарисуйте электрическую схему последовательного соединения проводников и запишите правила для расчета силы тока, напряжения и сопротивления.

6. Нарисуйте электрическую схему параллельного соединения проводников и запишите правила для расчета силы тока, напряжения и сопротивления.

Лабораторная работа № 1.1.2

Сопротивление параллельного и последовательного соединения резисторов

Цель работы: определить сопротивление резисторов при различных видах их соединения при помощи амперметра и вольтметра.

Приборы и материалы: источник постоянного тока, ключ, миллиамперметр многопредельный, вольтметр многопредельный, магазин сопротивлений, резисторы, сопротивление которых нужно определить, соединительные провода.

Экспериментальная установка

Сопротивление резистора можно найти из закона Ома по формуле

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1.17)$$

Лабораторная установка для измерения сопротивления с помощью амперметра и вольтметра (рис. 1.5) состоит из источника постоянного тока ε , ключа K , миллиамперметра mA , вольтметра V , магазина сопротивлений R , резисторов, сопротивление R_x которых нужно определить, соединительных проводов.

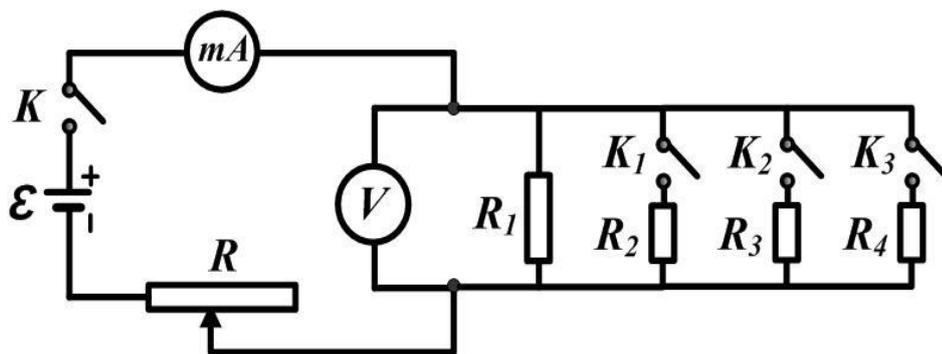


Рисунок 1.5 –
Электрическая
схема для оп-
ределения со-
противления
резисторов

Резисторы, сопротивления которых нужно определить, смонтированы в одной коробке. На лицевую панель коробки выведены контакты для присоединения резисторов в цепь.

Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу «Измерительные приборы» для амперметра и вольтметра.
2. Приготовьте таблицы для записи результатов измерений и расчетов.
3. Соберите цепь по схеме 1.5. Ключи K_1 , K_2 и K_3 разомкнуты. Замкните цепь, снимите показания амперметра и вольтметра.
4. Опыт повторите еще три раза, меняя сопротивление на магазине сопротивлений R .

Таблица 1.2

№ п/п	Резистор 1					Резисторы 1 и 2				
	I	U	R_1	$R_{1\text{cp}}$	ΔR_1	I	U	R_2	$R_{21\text{cp}}$	ΔR_{21}
Ед. изм.										
1										
2										
3										

5. Рассчитайте сопротивление цепи по формуле (1.17).
6. Найдите среднее сопротивление $R_{1\text{cp}}$:

$$R_{cp} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3}.$$

7. Рассчитайте ошибку измерения по формуле для прямых измерений

$$\Delta R = t \cdot \sqrt{\frac{\Delta R_1^2 + \Delta R_2^2 + \Delta R_3^2}{3 \cdot 3 - 1}},$$

где t – коэффициент Стьюдента, который нужно найти из таблицы Стьюдента.

8. Результаты занесите в таблицу 1.3.

9. Замыкайте последовательно ключи 1, 2, 3 и проделывайте измерения, описанные в пунктах 4 – 8. Значения записывайте в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

№ п/п	Резисторы 1, 2 и 3					Резисторы 1, 2, 3 и 4				
	I	U	R_{123}	$R_{123\text{ ср}}$	$\Delta R_{1\text{ ср}}$	I	U	R_{2134}	$R_{2134\text{ ср}}$	$\Delta R_{2134\text{ ср}}$
Ед. изм.										
1										
2										
3										

10. Запишите выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрическое сопротивление элемента цепи? Какие бывают сопротивления?

2. Дайте определение электрического сопротивления. Запишите формулу сопротивления металлического проводника и объясните значение каждой величины, входящей в эту формулу. В каких единицах измеряется сопротивление и удельное сопротивление в системе СИ?

3. Дайте определения силы тока, падения напряжения, электродвижущей силы источника тока.

4. Запишите законы Ома для однородного участка цепи, для неоднородного участка цепи, для замкнутой цепи.

5. Нарисуйте электрические схемы последовательного и параллельного соединения проводников и запишите правила для расчета силы тока, напряжения и сопротивления.

6. Выведите формулу расчета полного сопротивления для схемы, приведенной на рисунке 1.5, в зависимости от различных видов включения.

Лабораторная работа № 1.1.3

Определение зависимости сопротивления металлического проводника от его длины при помощи мостика постоянного тока (мостика Уитстона)

Цель работы: ознакомиться с методом измерения сопротивлений при помощи мостика постоянного тока, определить сопротивление $R(x)$ реостата при разном положении движка и изучить зависимость сопротивления от длины намотки проволоки.

Приборы и материалы: гальванометр, реохорд, магазин сопротивлений, источник постоянного тока, ключ, реостат, сопротивление которого измеряем, соединительные провода, штангенциркуль, линейка.

Экспериментальная установка

Для определения сопротивления проводников с большой точностью используют метод уравновешенного моста (мостик Уитстона). Метод любой мостиковой схемы заключается в отсутствии тока на гальванометре G .

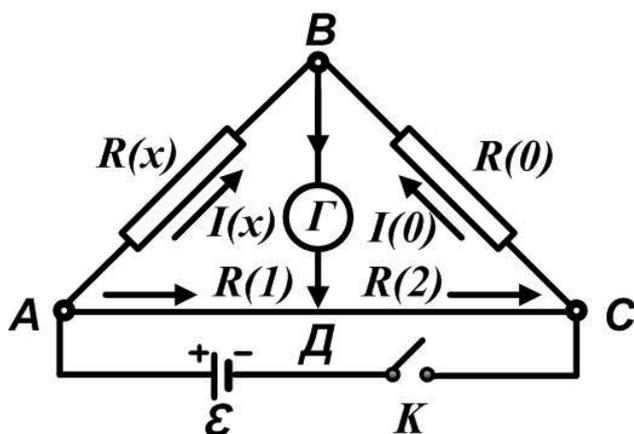


Рисунок 1.6 –
Электрическая
схема мостика
Уитстона

Рассмотрим схему мостика Уитстона (рис. 1.6). Цепь, идущая от источника постоянного тока ε , разветвляется. Одну ее часть образуют сопротивления $R(x)$ и $R(0)$, соединенные последовательно. Вторую часть образует реохорд. Реохорд представляет собой проволоку

с высоким удельным сопротивлением длиной 1 м, прикрепленную к проградуированной направляющей линейке. По проволоке двигается контакт, который меняет длину проволоки под напряжением и тем самым меняет сопротивление в цепи.

С точкой B , соединяющей сопротивления $R(x)$ и $R(0)$, соединена одна из клемм гальванометра Γ , а вторая клемма подключена к контакту D , скользящему по реохорду AC . Передвигая контакт D вдоль провода AC , мы изменяем длину участков провода AD и DC и тем самым меняем сопротивления $R(1)$ и $R(2)$.

Обозначим силы тока в ветвях моста через $I(1)$, $I(2)$, $I(x)$, $I(0)$, $I(\Gamma)$. Запишем правила Кирхгофа для узлов B и D и для контуров $ABDA$ и $BCDB$ при условии, что ток, проходящий через гальванометр, равен нулю ($I(\Gamma) = 0$).

Первое правило Кирхгофа: в узле разветвленной цепи сумма сил токов равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0.$$

Применим это правило к узлу B :

$$I(x) + I(0) = 0 \quad \Rightarrow \quad I(x) = I(0).$$

Применим это правило к узлу D :

$$I(1) + I(2) = 0 \quad \Rightarrow \quad I(1) = I(2).$$

Значения токов берутся здесь без учета знаков.

Второе правило Кирхгофа: в замкнутом контуре разветвленной цепи сумма ЭДС ε_i включенных источников тока равна сумме произведений сопротивлений на силы тока в отдельных участках контура:

$$\sum_i \varepsilon_i = \sum_i R_k I_k.$$

Применим это правило к контуру $ABDA$:

$$I(x)R(x) + I(1)R(1) = 0 \quad \Rightarrow \quad I(x)R(x) = I(1)R(1).$$

Применим это правило к контуру $BCDB$:

$$I(0)R(0) + I(2)R(2) = 0 \quad \Rightarrow \quad I(0)R(0) = I(2)R(2).$$

Из уравнений легко получить

$$\frac{R(x)}{R(0)} = \frac{R(1)}{R(2)},$$

откуда

$$R(x) = R(0) \frac{R(1)}{R(2)}. \quad (1.18)$$

Проводник участка цепи AC однороден, поэтому сопротивления R_1 и R_2 пропорциональны их длинам:

$$\frac{R(1)}{R(2)} = \frac{L_1}{L_2}.$$

Тогда равенство (1.18) можно записать так:

$$R(x) = R(0) \frac{L_1}{L_2}. \quad (1.19)$$

Так как длины L_1 и L_2 легко измеряются, а $R(0)$ известно, то уравнение (1.19) позволяет определить неизвестное сопротивление $R(x)$.

Примечание: точность определения $R(x)$ указанным методом в большой степени зависит от положения движка D на реохорде AC . Наибольшая точность при всех других равных условиях достигается при $L_1 \cong L_2$. Для этого следует подбирать известное сопротивление $R(0)$ таким, чтобы оно не слишком отличалось от измеряемого сопротивления $R(x)$.

Порядок выполнения работы

1. Опишите приборы установки схемы 1.6 в таблице по приборам.
2. При выключенном питании стрелка гальванометра должна находиться в положении «0». Если стрелка не стоит на нуле, нужно отрегулировать ее при помощи ручки на задней панели гальванометра.
3. Поставьте движок реостата на расстоянии 5 см от начала катушки проволоки и измерьте сопротивление при помощи мостика постоянного тока как описано ниже.
4. Движок реохорда D поставьте на середину шкалы, длины плеч реохорда равны $L_1 = L_2 = 0,5$ м; все ручки магазина сопротивления

стоят на нулях, сопротивление $R_0 = 0$ Ом. Включите источник постоянного тока в сеть, замкните ключ, стрелка гальванометра отклонится от нулевого деления.

5. Подберите на магазине сопротивлений такое сопротивление, при котором стрелка гальванометра установится на нулевое деление; значение сопротивления моста R_0 запишите в таблицу 1.4.

6. Рассчитайте неизвестное сопротивление R_x по формуле (1.17) и запишите в таблицу 1.4.

7. Сдвиньте движок реохорда D на 15 см от середины шкалы влево, далее действовать как в пункте (5).

8. Сдвиньте движок реохорда D на 15 см от середины шкалы вправо, далее действовать как в пункте (5).

Таблица 1.4

	№ п/п	R_0	l_1	l_2	R_x	$R_{x\text{ ср}}$	ΔR_x
	Ед.изм.	Ом	м	м	Ом	Ом	Ом
$L_1 = 5\text{см}$	1		0,5	0,5			
	2		0,35	0,65			
	3		0,65	0,35			
$L_2 = 10\text{см}$	1		0,5	0,5			
	2		0,35	0,65			
	3		0,65	0,35			
$L_3 = 15\text{см}$	1		0,5	0,5			
	2		0,35	0,65			
	3		0,65	0,35			
$L_4 = 20\text{см}$	1		0,5	0,5			
	2		0,35	0,65			
	3		0,65	0,35			
$L_5 = 25\text{см}$	1		0,5	0,5			
	2		0,35	0,65			
	3		0,65	0,35			

9. Рассчитайте среднее арифметическое из трех измерений $R_{x\text{ ср}}$, абсолютную ошибку по методу Стьюдента.

10. Передвиньте движок реостата на расстоянии 10 см от начала катушки проволоки и измерьте сопротивление при помощи мостика постоянного тока как описано в пунктах (4–9).

11. Повторите те же действия при длине катушки реостата $L = 15, 20$ и 25 см.

12. Возьмите штангенциркуль, установите расстояние между ножками – 1 см. Приложите его к реостату и подсчитайте, сколько

витков проволоки помещается на 1 см поверхности реостата. Переведите в метры.

13. Измерьте диаметр реостата D штангенциркулем. Измерьте линейкой длину каркаса реостата с проволокой Z . Результаты в метрах запишите в таблицу 1.5.

Таблица 1.5

№ п/п	n	D	Z	L	$R_{\text{ср}}$
Ед. изм.	м^{-1}	м	м	м	Ом
1			0,05		
2			0,10		
3			0,15		
4			0,20		
5			0,25		

14. Рассчитайте длину обмотки реостата, которая равна длине одного витка πD , умноженной на общее число витков реостата n :

$$L = \pi D n Z .$$

15. Постройте график зависимости $R(L)$.

16. Сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Постоянный электрический ток. Условия существования электрического тока. Сила тока.
2. Потенциал электрического поля.
3. Источники тока. ЭДС – электродвижущая сила. Сторонние силы.
4. Напряжение.
5. Электрическое сопротивление проводника.
6. Закон Ома для однородного участка цепи.
7. Закон Ома для неоднородного участка цепи.
8. Закон Ома для замкнутой цепи.
9. Правила Кирхгофа. Применение их для нашей цепи.

ТЕМА 1.2. ВИДЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМ И ПРИБОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Электрической цепью называется такое соединение электрических элементов, при котором под воздействием источника электрической энергии в элементах протекает электрический ток.

Узел – точка соединения трех и более элементов.

Ветвь – участок цепи, содержащий хотя бы один элемент и находящийся между двумя ближайшими узлами.

Контур – замкнутая часть электрической цепи.

Перемычка – это электрический проводник с нулевым сопротивлением, подсоединенный своими концами к различным двум точкам схемы.

Классификация электрической цепи осуществляется по следующим признакам:

- наличие или отсутствие в цепи источника электрической энергии;
- наличие или отсутствие в цепи диссипативных элементов;
- в зависимости от характера вольтамперных характеристик электрических элементов;
- в зависимости от количества выводов электрической цепи.

Пассивной цепью называется цепь, не содержащая источника электрической энергии. В такой цепи присутствуют только диссипативные и реактивные элементы.

Активной цепью называется цепь, содержащая хотя бы один источник электрической энергии. К активным цепям относятся цепи, содержащие и усилительные элементы – транзисторы и электронные лампы, так как в их схемы замещения входят источники электрической энергии. Все пассивные и активные цепи, в свою очередь, подразделяются на *реактивные и диссипативные*.

Реактивной цепью называется цепь, содержащая только реактивные элементы. В таких цепях нет диссипативных элементов, а реактивные элементы считают идеальными.

Диссипативной цепью называется цепь, содержащая хотя бы один диссипативный элемент. Это может быть резистор или реактивный элемент. Очевидно, что в действительности все цепи диссипативные. Однако часто диссипативные составляющие в реактивных

элементах очень малы и ими можно пренебрегать. Тем не менее необходимо каждый раз это оценивать и оговаривать.

Все названные типы цепей в зависимости от вида вольтамперных характеристик элементов подразделяются на *линейные и нелинейные*.

Линейной электрической цепью называется цепь, содержащая элементы только с линейной вольтамперной характеристикой.

Нелинейной электрической цепью называется цепь, содержащая хотя бы один элемент с нелинейной вольтамперной характеристикой.

Последовательное соединение – такое соединение элементов, при котором в них протекает *один и тот же ток*.

Параллельное соединение – такое соединение элементов, к которым прикладывается одно и то же напряжение.

Последовательное соединение проводников (резисторов)

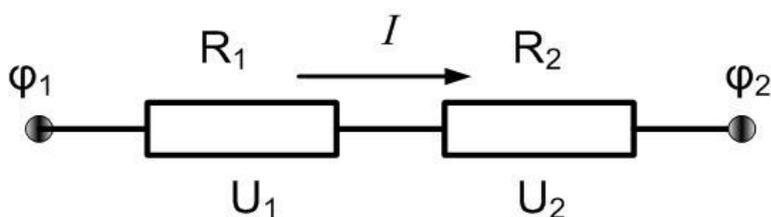


Рисунок 1.7 –

Пример электрической цепи с последовательным соединением резисторов

Сила тока на каждом из проводников одинакова:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n. \quad (1.20)$$

Напряжение на всем участке цепи равно сумме падений напряжения на каждом из проводников:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = U_1 + U_2 + \dots + U_n, \quad (1.21)$$

где $\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов на концах цепи.

Применяя закон Ома для однородного участка цепи, получаем:

$$IR = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n; \quad (1.22)$$

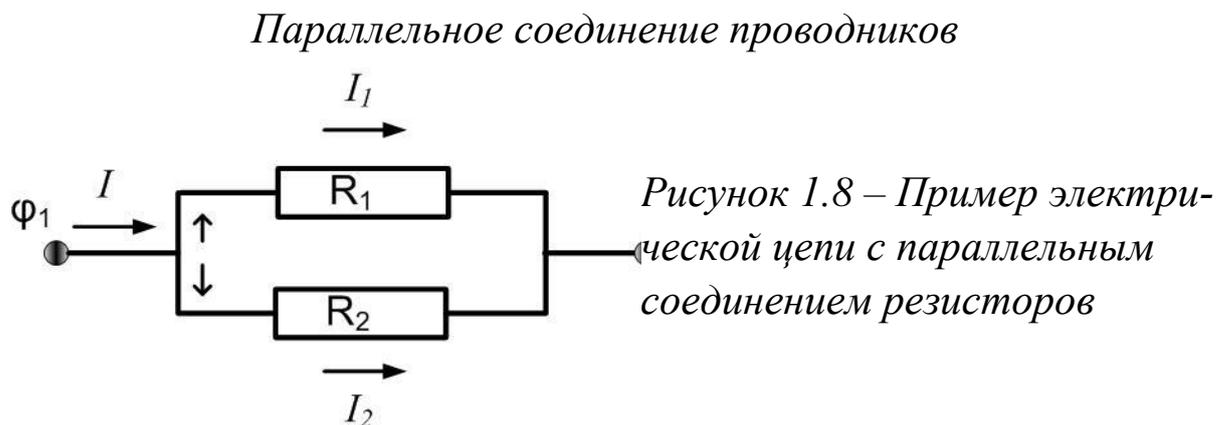
выносим I за скобку:

$$IR = I R_1 + R_2 + \dots + R_n ; \quad (1.23)$$

разделим на I обе части уравнения, получаем

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n . \quad (1.24)$$

Следовательно, при последовательном соединении резисторов полное сопротивление участка цепи равно сумме сопротивлений всех резисторов.



Напряжение на всем участке цепи равно падению напряжения на каждом проводнике:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = U_1 = U_2 = \dots = U_n . \quad (1.25)$$

Сила тока равна

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n . \quad (1.26)$$

Применяя закон Ома для однородного участка цепи, получаем:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}; \quad (1.27)$$

разделим на U обе части уравнения, получаем:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (1.28)$$

Отметим несколько особенностей для параллельно соединенных резисторов. Эквивалентное сопротивление параллельно соединенных резисторов меньше наименьшего сопротивления из всех резисторов в соединении. Это позволяет сделать вывод, что параллельное подключение резистора к какой-либо цепи уменьшает общее (эквивалентное) сопротивление этой цепи.

Элементы управления цепи. Для регулировки силы тока и напряжения в цепи используют переменные резисторы, реостаты, магазины сопротивлений. Регулировка напряжения в цепях переменного тока может осуществляться с помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТР).

Реостат. Для плавного изменения сопротивления цепи применяется ползунковый реостат. Изготавливаются реостаты в пределах 5–10000 Ом. Каждый реостат рассчитан на определенный максимальный ток, указанный на приборе. Пропускать ток, превышающий величину, указанную на приборе, нельзя во избежание перегорания обмотки. Принцип действия реостата основан на зависимости сопротивления проволоки от ее длины:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где R – сопротивление проволоки;

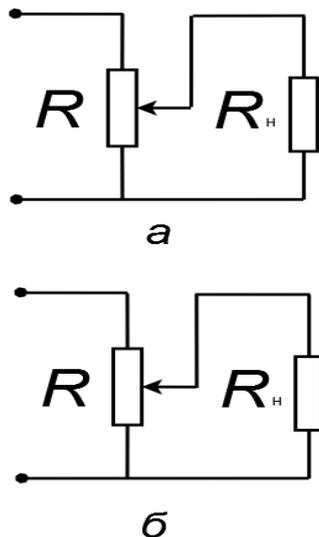
ρ – удельное сопротивление проволоки;

l – длина проволоки;

S – площадь поперечного сечения проволоки.

Существует 2 вида подключения реостата в цепь. Для изменения силы тока в цепи используют реостатное включение (см. рис. 1.9, а).

Для изменения напряжения в цепи от нуля до максимального значения применяется потенциометрическое включение (см. рис. 1.9, б). Реостат при таком включении часто называется потенциометром.



*Рисунок 1.9 –
Способы включения реостатов в цепь:
а – реостатное включение;
б – потенциометрическое включение;
R – реостат;
R_н – нагрузочное сопротивление цепи*

Лабораторная работа № 1.2.1

Стандартные обозначения элементов электрических схем.

Проектировка и сбор электрических цепей

Цель работы: научиться проектировать чертить и собирать электрические схемы.

Приборы и материалы: различные элементы электрических схем: гальванические элементы, резисторы, трансформаторы, диоды, предохранители, конденсаторы, лампочки, переключатели, ключи, соединительные провода и др.

Таблица 1.6 – Условные графические обозначения в схемах.
Обозначения общего применения (ГОСТ 2.721-74)

Название элемента	Обозначение на схемах	Название элемента	Обозначение на схемах
Элемент гальванический или аккумулятор		Выключатель однополюсной	
Электрическая лампа накаливания		Предохранитель плавкий	
Резистор постоянный		Реостат регулируемый	
Диод полупроводниковый		Резистор переменный	
Транзистор		Конденсатор постоянной емкости	
Катушка индуктивности без магнитопровода		Конденсатор переменной емкости	
Трансформатор		Катушка индуктивности с магнитопроводом	
Амперметр		Вольтметр	
Звонок		Светодиод	

Порядок выполнения работы

Студенты получают элементы схем и собирают одну из нижеприведенных схем по указанию преподавателя.

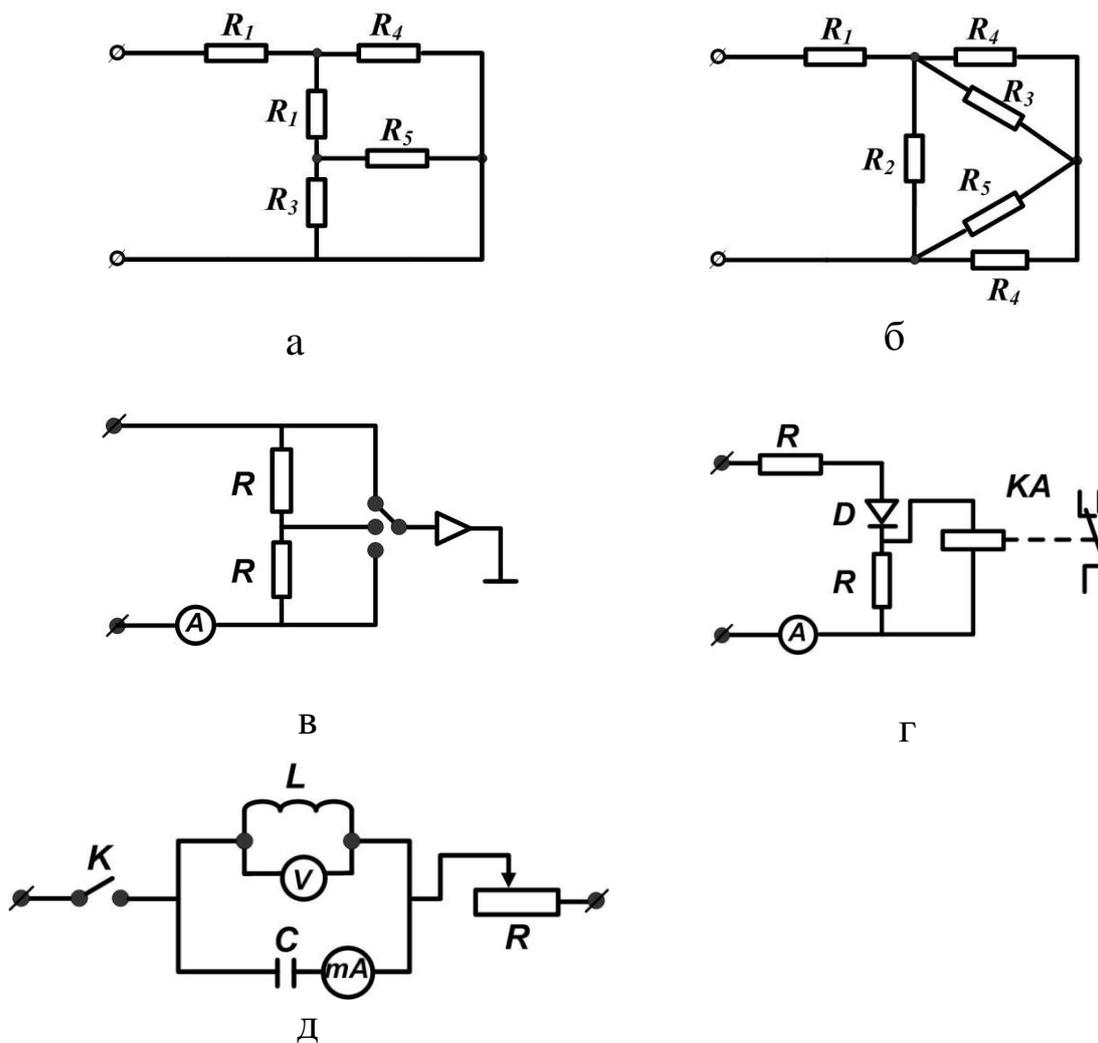


Рисунок 1.10 – Примеры собираемых электрических схем

Контрольные вопросы

1. Какие виды электрических схем вы знаете?
2. Какие виды электрических элементов бывают? Как изображаются элементы электрических схем?
3. Какое соединение проводников называют параллельным? Изобразите его на схеме.
4. Какая из электрических величин одинакова для всех проводников, соединенных параллельно?
5. Как выражается сила тока в цепи до ее разветвления через силы токов в отдельных ветвях разветвления?
6. Как изменяется общее сопротивление разветвления после увеличения числа проводников в разветвлении?

7. Какое соединение проводников применяется в жилых помещениях?
8. Какие напряжения используются для бытовых нужд?

Лабораторная работа № 1.2.2

Изучение видов подключения реостата

Цель работы: ознакомиться с видами подключения реостата, определить сопротивление резистора.

Приборы и материалы: компьютер, программа EWB512 – Electronics Workbench.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Реостатное подключение

1. Начертите в тетради схему электрической цепи, состоящей из источника постоянного тока, реостата, резистора нагрузки, амперметра и вольтметра. Включите реостат в режиме регулирования тока. К клеммам резистора подключите последовательно вольтметр, амперметр.

2. Покажите схему преподавателю.

3. На персональном компьютере открыть папку EWB512 – Electronics Workbench. В папке выберите файл WEWB32 и нажмите на него.

4. Соберите свою электрическую цепь и предъявите ее на проверку преподавателю. Значения ЭДС источника и резистора нагрузки выберите по указанию преподавателя.

5. Наведите мышку на реостат и нажмите на левую кнопку на мышке. В окошке выберите «Component Properties» и поставьте значения в «Resistance» (R): 1 kΩ; «Setting»: 0%; «Increment»: 20%. Нажмите ОК.

6. Измерьте силу тока и напряжение при сопротивлениях реостата 0% R, 20% R, 40% R, 60% R, 80% R и 100% R. Измеренные величины запишите в таблицу 1.7.

Таблица 1.7

Положение ползунка реостата	I, А	U, В
0% R реостата		
20% R реостата		
40% R реостата		
60% R реостата		
80% R реостата		
100% R реостата		

Задание 2. Потенциометрическое подключение

1. Начертите в тетради схему электрической цепи, состоящей из источника постоянного тока, реостата, резистора нагрузки, амперметра и вольтметра. Включите реостат в режиме регулирования напряжения. К клеммам резистора подключите последовательно вольтметр, амперметр.

2. Покажите схему преподавателю.

3. Соберите свою электрическую цепь на компьютере и предъявите ее на проверку преподавателю. Значения ЭДС источника тока и резистора нагрузки поставьте как в первом задании.

4. Наведите мышку на реостат и нажмите на левую кнопку на мышке. В окошке выбрать «Component Properties» и поставить значения в «Resistance (R): 1 k Ω »; «Setting»: 0%; «Increment»: 20%. Нажать ОК.

5. Измерьте силу тока и напряжение при разных сопротивлениях на реостате. Измеренные величины запишите в таблицу 1.8.

6. Рассчитайте сопротивление резистора.

Таблица 1.8

Положение бегунка реостата	I, А	U, В
0% R реостата		
20% R реостата		
40% R реостата		
60% R реостата		
80% R реостата		
100% R реостата		

7. Постройте график зависимости силы тока от напряжения.
 8. Сравните полученные данные в первом и во втором задании.
- Сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Реостат: конструкция и применение.
2. Виды подключения реостата.
3. Дать определение силы тока.
4. Дать определение напряжения и ЭДС.
5. Дать определение сопротивления.
6. Законы Ома.

ЧАСТЬ 2. МАГНИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Впервые магнитное действие тока было доказано в 1820 году Эрстедом. С тех пор магнитное действие тока широко используется в науке и технике: например, для измерения силы тока и напряжения в электроизмерительных приборах; также электромагниты применяются для переноски стальных болванок, в сепараторах для очистки зерна и других технологиях. Рассмотрим явление магнитного поля, его характеристики и действия на токи и заряды.

ТЕМА 2.1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

Магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами и его главное свойство – действовать на движущиеся заряды. Исследования свойств магнитного поля проводят на проволочном витке с током, который называется пробный контур. Пробный контур помещают в магнитное поле, и он поворачивается (см. рис. 2.1). При изменении направления тока в контуре виток поворачивается на угол 180° .

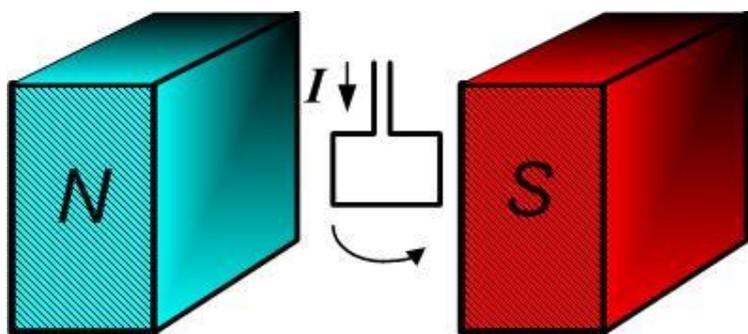


Рисунок 2.1 –
Пробный контур с током
в магнитном поле

Пробный контур испытывает действие вращающего момента силы (M), который равен векторному произведению

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}],$$

где $\vec{p}_m = IS$ – магнитный момент контура.

Вектор индукции магнитного поля (B) определяется как отношение вращающего момента к вектору магнитного момента:

$$\vec{B} = \frac{\vec{M}}{P_m} .$$

Единица измерения вектора магнитной индукции B – *тесла (Тл)*. Магнитная индукция является силовой характеристикой магнитного поля в данной точке пространства. Вторая характеристика магнитного поля называется вектор напряженности магнитного поля. Магнитное поле в вакууме принято характеризовать не индукцией, а напряженностью.

Вектор напряженности магнитного поля (H) – силовая характеристика магнитного поля. Единица измерения – *Ампер/метр (А/м)*. Связь между напряженностью и индукцией магнитного поля:

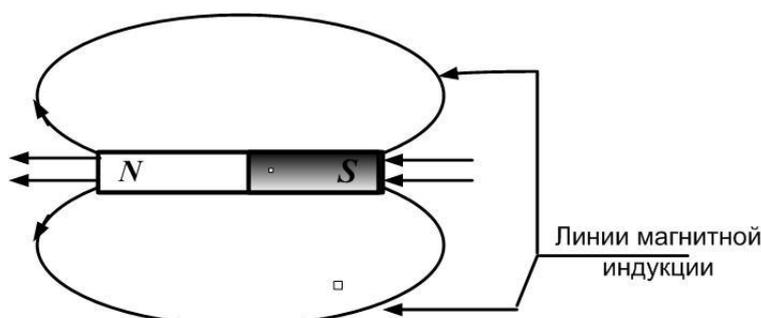
$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (2.1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная;

μ – относительная магнитная проницаемость среды, равная отношению индукции магнитного поля в веществе к индукции магнитного поля в вакууме:

$$\mu = \frac{B'(\text{в веществе})}{B(\text{в вакууме})}. \quad (2.2)$$

Для графического изображения магнитных полей используют линии магнитной индукции. *Линии магнитной индукции* – линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этой точке. Направление линий магнитного поля постоянного магнита выбрано так, что из северного полюса линии выходят, а в южный полюс входят (см. рис. 2.2).



*Рисунок 2.2 –
Графическое изображение магнитного поля постоянного магнита*

Направление магнитного поля проводника с током определяется по правилу правого винта или буравчика. *Правило правого винта:*

за направление магнитного поля тока рамки (кругового тока) принимается направление поступательного движения винта, головка которого вращается в направлении тока, текущего в рамке.

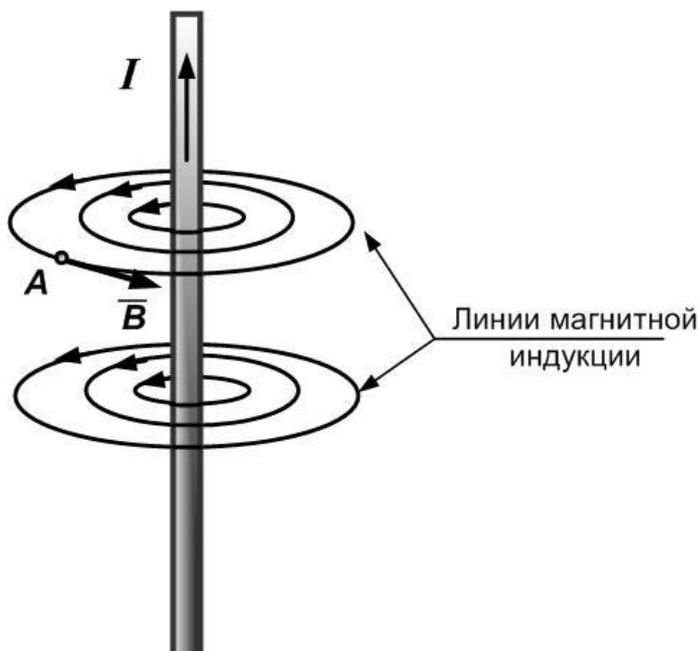
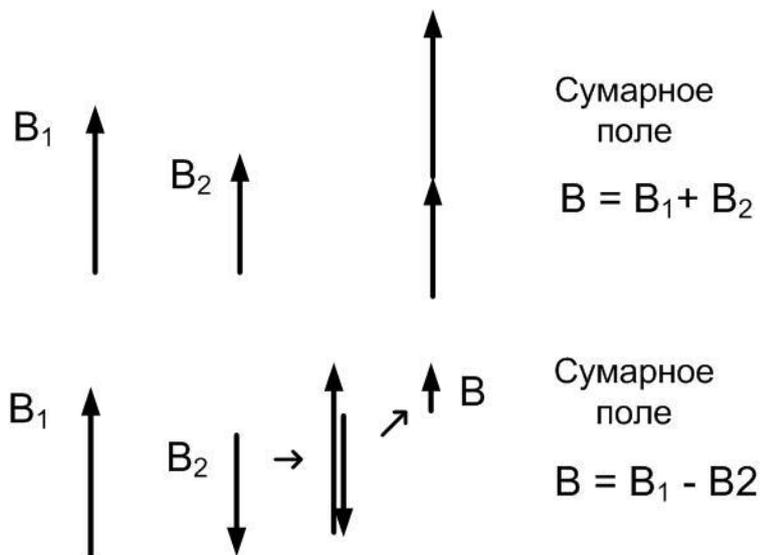


Рисунок 2.3 –
Графическое изображение магнитного поля проводников с током в магнитном поле

Принцип суперпозиции: результирующий вектор магнитной индукции в данной точке складывается из векторов магнитной индукции, созданной различными токами в этой точке (сложение должно быть векторное). Примеры векторного сложения магнитных полей представлены на рисунке 2.4.



Сумарное поле
 $B = B_1 + B_2$

Сумарное поле
 $B = B_1 - B_2$

Рисунок 2.4 –
Примеры сложения полей с различным направлением векторов магнитной индукции

Закон Био-Савара-Лапласа позволяет вычислить индукцию магнитного поля, которое создается током, текущим по участку провод-

ника длиной dl , в точке, расположенной от этого участка на расстоянии r , как показано на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Изображение проводника с током для объяснения закона Био-Савара-Лапласа

Формула закона Био-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I dl \cdot \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (2.3)$$

где α – угол между направлением тока в участке dl и радиусом вектором r , соединяющим этот участок с рассматриваемой точкой поля. Чтобы определить индукцию поля, создаваемого всем проводником, нужно проинтегрировать выражение (2.3) по всей длине проводника l :

$$B = \int_0^l dB.$$

Сила Ампера. На проводник с током I в магнитном поле B (рис. 2.6) согласно закону Ампера действует сила

$$\vec{F} = I [\vec{\ell} \times \vec{B}]. \quad (2.4)$$

В модульном виде

$$F = B \cdot I \cdot \ell \cdot \sin \alpha, \quad (2.5)$$

где B – вектор магнитной индукции внешнего поля;

ℓ – длина активной части проводника;

I – сила тока;

α – угол между вектором B и длиной l проводника с током.

Направление силы Ампера определяется *правилом левой руки*: если левую руку расположить так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а направление вытянутых пальцев совпадало с направлением тока, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на этот ток. Следует иметь в виду, что сила ампера направлена перпендикулярно плоскости, в которой лежат вектор магнитной индукции и проводник с током.

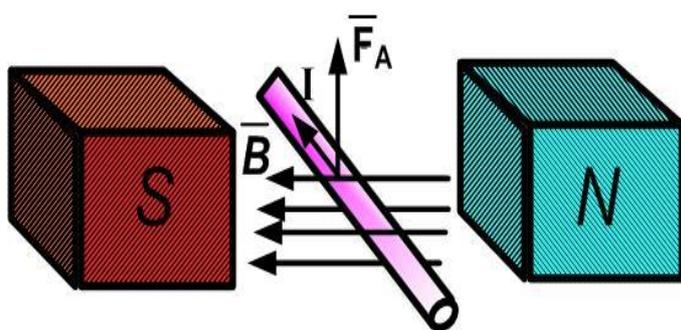


Рисунок 2.6 –
К определению
направления си-
лы Ампера

Лабораторная работа № 2.1.1 Электроизмерительные приборы

Цель работы: ознакомиться с работой электроизмерительных приборов.

Приборы и материалы: приборы магнитоэлектрической системы, приборы электромагнитной системы.

Измерения электрических величин, таких как напряжение, сопротивление, сила тока, мощность, производятся с помощью различных средств – измерительных приборов, схем и специальных устройств. Тип измерительного прибора зависит от вида и размера (диапазона значений) измеряемой величины, а также от требуемой точности измерения.

Все электроизмерительные приборы делятся на аналоговые и цифровые. Первые обычно показывают значение измеряемой величины посредством стрелки, перемещающейся по шкале с делениями. Вторые снабжены цифровым дисплеем, который показывает измеренное значение величины в виде числа. Цифровые приборы в большинстве измерений более предпочтительны, так как они более точны, более удобны при снятии показаний и, в общем, более универсальны.

Аналоговые приборы постепенно вытесняются цифровыми, хотя они еще находят применение там, где важна низкая стоимость и не нужна высокая точность.

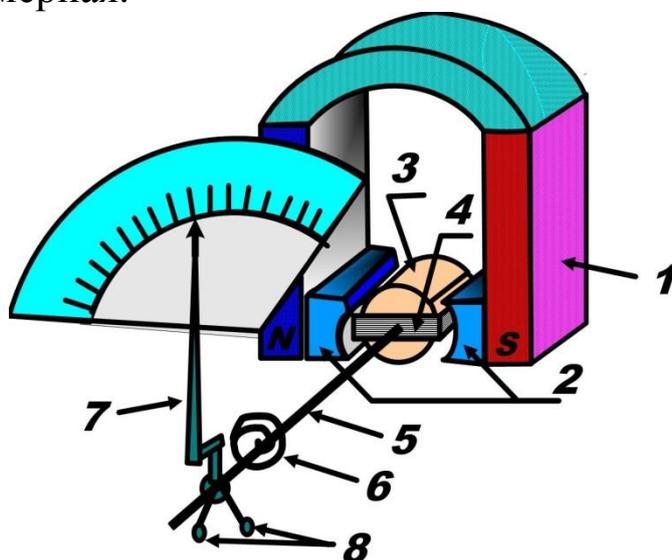
Для самых точных измерений сопротивления и полного сопротивления (импеданса) существуют *измерительные мосты* и другие специализированные измерители. Для регистрации хода изменения измеряемой величины во времени применяются *регистрирующие приборы* – ленточные самописцы и электронные осциллографы, аналоговые и цифровые.

Цифровые приборы. Во всех цифровых измерительных приборах (кроме простейших) используются усилители и другие электронные блоки для преобразования входного сигнала в сигнал напряжения, который затем преобразуется в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Число, выражающее измеренное значение, выводится на светодиодный (СИД), вакуумный люминесцентный или жидкокристаллический (ЖК) индикатор (дисплей). Прибор обычно работает под управлением встроенного микропроцессора, причем в простых приборах микропроцессор объединяется с АЦП на одной интегральной схеме. Цифровые приборы хорошо подходят для работы с подключением к внешнему компьютеру. В некоторых видах измерений такой компьютер переключает измерительные функции прибора и дает команды передачи данных для их обработки. Мультиметры могут измерять напряжение постоянного и переменного тока, силу тока, сопротивление постоянному току и иногда температуру. Эти самые распространенные контрольно-измерительные приборы общего назначения с погрешностью измерения от 0,2 до 0,001% могут иметь 3,5- или 4,5-значный цифровой дисплей.

Аналоговые приборы делятся по типам систем. Рассмотрим несколько таких систем.

Магнитоэлектрическая система приборов. Для измерения напряжения, силы тока и сопротивления на постоянном токе применяются аналоговые магнитоэлектрические приборы с постоянным магнитом и многовитковой подвижной частью. Такие приборы стрелочного типа характеризуются погрешностью от 0,5 до 5%. Они просты и недороги (пример – автомобильные приборы, показывающие ток и температуру). В таких приборах используется сила взаимодействия магнитного поля с током в витках обмотки подвижной части. Магнитное поле стремится повернуть подвижную часть – рамку с током (рис.

2.7). Момент этой силы уравнивается моментом, создаваемым противодействующей пружиной, так что каждому значению тока соответствует определенное положение стрелки на шкале. Подвижная часть имеет форму многовитковой проволочной рамки с размерами от 3-5 до 25-35 мм и делается как можно более легкой. Подвижная часть, установленная на каменных подшипниках или подвешенная на металлической ленточке, помещается между полюсами сильного постоянного магнита. Две спиральные пружинки, уравнивающие крутящий момент, служат также токопроводами обмотки подвижной части. Вследствие равномерности радиального магнитного поля, приложенный к рамке вращающий момент прямо пропорционален протекающему по обмотке рамки току. Поэтому шкала прибора равномерная.



*Рисунок 2.7 – Магнито-электрическая система:
 1 – постоянный магнит;
 2 – полюса магнита;
 3 – катушка;
 4 – подвижная рамка, по которой идет ток;
 5 – металлическая ось;
 6 – пружина;
 7 – стрелка;
 8 – успокоитель*

Прибор реагирует на ток, проходящий по обмотке его подвижной части, а потому чаще всего представляет собой амперметр или, точнее, миллиамперметр (так как верхний предел диапазона измерений не превышает примерно 50 мА). Его можно приспособить для измерения токов большей силы, присоединив параллельно обмотке подвижной части шунтирующий резистор с малым сопротивлением, чтобы в обмотку подвижной части ответвлялась лишь малая доля полного измеряемого тока. Такое устройство пригодно для токов, измеряемых многими тысячами ампер. Если последовательно с обмоткой присоединить добавочный резистор, то прибор превратится в вольтметр. Падение напряжения на таком последовательном соединении равно произведению сопротивления резистора на ток, показываемый прибором, так что его шкалу можно проградуировать в вольтах. Чтобы сделать из магнитоэлектрического миллиампермет-

ра омметр, нужно присоединять к нему последовательно измеряемые резисторы и подавать на это последовательное соединение постоянное напряжение, например от батареи питания. Ток в такой схеме не будет пропорционален сопротивлению, а потому необходима специальная шкала, корректирующая нелинейность. Тогда можно будет производить по шкале прямой отсчет сопротивления, хотя и с не очень высокой точностью.

Преимущества приборов магнитоэлектрической системы: простота конструкции, высокая чувствительность и точность показаний, равномерная шкала, нечувствительность к внешним магнитным полям, малое потребление энергии.

Недостатками приборов магнитоэлектрической системы являются невозможность измерения переменных и больших значений сил токов, большой размер прибора, чувствительность к механическим ударам и перегрузкам.

Электромагнитная система. Принцип действия приборов этой системы основан на взаимодействии магнитного поля неподвижной катушки 1 (рис. 2.8), по которой протекает измеряемый ток I , и подвижного железного сердечника 2. Плоский ферромагнитный сердечник эксцентрично закреплен на оси вместе с противодействующей пружиной 3 и стрелкой 4. При пропускании тока по катушке сердечник втягивается внутрь, при этом закручивается пружина и стрелка прибора поворачивается на угол φ .

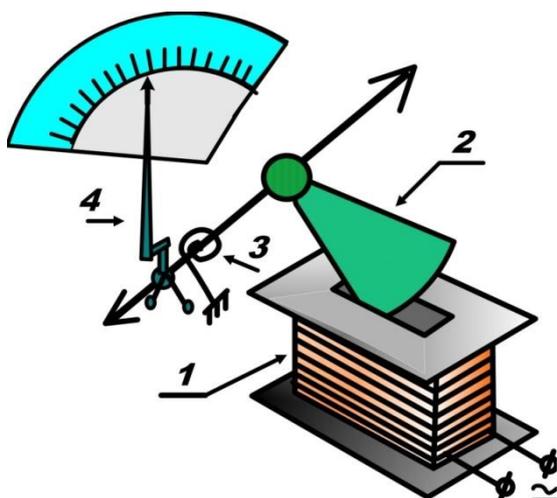


Рисунок 2.8 – Электромагнитная система:

- 1 – неподвижная катушка, по которой протекает измеряемый ток (I);
- 2 – подвижный железный сердечник;
- 3 – пружина;
- 4 – стрелка

Втягивающий момент пропорционален квадрату силы тока: $M = k_1 I^2$. При равновесии втягивающий момент уравновешивается моментом, создаваемым закрученной пружиной: $k_1 I^2 = k_2 \varphi$; следовательно шкала приборов электромагнитной системы неравномерная ($\varphi \sim I^2$). С изменением направления тока меняются направление маг-

нитного поля и полярность намагничивающегося сердечника. Поэтому приборы электромагнитной системы применяются для измерений как постоянных, так и переменных токов.

К достоинствам приборов этой системы относится простота конструкции, выносливость в отношении перегрузок, возможность измерения постоянных и переменных токов. Изменяя число витков и сечение провода обмотки, легко изготовить приборы на разные токи полного отклонения (обычно от 100 мА до 100 А).

Недостатками приборов электромагнитной системы являются малая чувствительность, неравномерность шкалы, меньшая точность по сравнению с магнитоэлектрическими приборами, зависимость показаний от внешних магнитных полей, зависимость показаний от частоты. Применяются приборы с электромагнитной системой в тех случаях, когда нет необходимости в большой точности измерений, а низкая цена прибора очень важна.

Порядок выполнения работы

Каждый из студентов получает от преподавателя электроизмерительные приборы и заполняет таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Сведения об измерительных приборах

Название прибора	Система	Род тока	Класс точности	Предел измерений	Цена деления	Чувствительность	Погрешность прибора

Применительно к стрелочным приборам, расположенным на лабораторном столе, ответить на вопросы:

1. Является ли прибор прибором одно- или многоцелевого назначения?
2. Как проводить измерения на однопредельном приборе и многопредельном приборе?
3. Каковы пределы измерения?
4. Какова цена деления? (если прибор многопредельный, то указать цену деления для разных пределов)
5. Какова чувствительность? (для одного предела)
6. Какова система прибора?

7. В каких электрических цепях можно производить измерения этим прибором?
8. Каков класс точности?

Контрольные вопросы

1. Виды электроизмерительных приборов.
2. Цифровые приборы.
3. Принципы работы приборов магнитоэлектрической системы.
4. Принципы работы приборов электромагнитной системы.
5. Конструктивные недостатки и достоинства приборов разных систем.
6. Класс точности приборов.
7. Чувствительность и погрешность приборов.

ТЕМА 2.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

При изменениях магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, в последнем возникает электрический ток. Ток, возникающий в контуре, называется *индукционным*. На явлении электромагнитной индукции основаны действия таких приборов, как генераторы тока, трансформаторы, радиовещание, катушка зажигания и другие.

В 1831 году М. Фарадей экспериментально обнаружил явление электромагнитной индукции. Первый опыт Фарадея приведен на рисунке 2.9. Катушка присоединена к гальванометру.

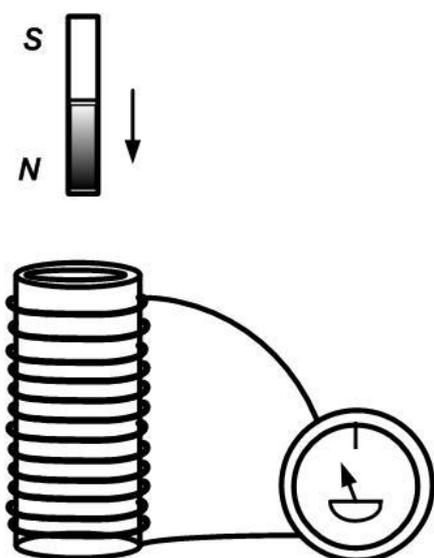


Рисунок 2.9 –
Опыт Фарадея № 1

Если в катушку вдвигать или выдвигать постоянный магнит, то в моменты его введения или выдвигания наблюдается отклонение стрелки гальванометра (возникновение индукционного тока); направления отклонения стрелки при введении и выдвигании магнита противоположны, т.е. направление индуцированного тока различно и знак ЭДС индукции разный. Отклонения стрелки гальванометра тем больше, чем больше скорость движения магнита относительно катушки. При изменении полюсов магнита направление отклонения стрелки изменится. Такой же эффект будет, если магнит оставлять неподвижным, а передвигать соленоид.

Опыт 2 приведен на рисунке 2.10. Один соленоид подключен к гальванометру. Другой соленоид подключен к источнику тока и реостату.

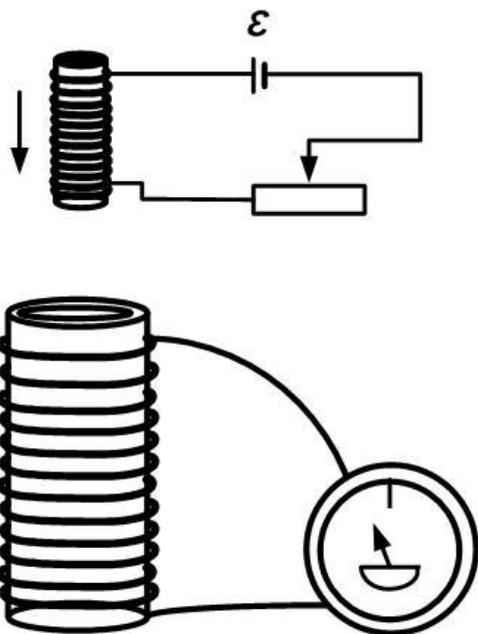


Рисунок 2.10 –
Опыт Фарадея № 2:
 ε – гальванический элемент;
 R – реостат

Отклонение стрелки гальванометра наблюдается в моменты включения или выключения тока, в моменты его увеличения или уменьшения или при перемещении катушек друг относительно друга. Направления отклонения стрелки противоположны при включении и выключении тока, при введении и выдвигании катушек.

Выводы: индукционный ток возникает всегда, когда происходит изменение сцепленного с контуром потока магнитной индукции; сила индукционного тока не зависит от способа изменения потока магнитной индукции, а определяется лишь скоростью его изменения. Вследствие данных опытов был написан закон Фарадея.

Закон Фарадея: ЭДС ε электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} . \quad (2.6)$$

Если у вас не один контур, а много витков, надо умножать на число витков.

Профессор Петербургского университета Эмиль Христианович Ленц (1804 – 1865 гг.) в 1833 году сформулировал закон, который указывает направление возникающего индукционного тока. *Правило Ленца:* индукционный ток, возникающий в замкнутом контуре, всегда

направлен так, что созданный им магнитный поток препятствует всякому изменению магнитного потока, вызывающего этот ток.

Самоиндукция – возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока. Ток I в замкнутом контуре создаёт вокруг себя магнитное поле, пропорциональное току. Поэтому магнитный поток Φ , сцепленный с контуром, меняется при изменении тока, а при изменении магнитного потока по закону Фарадея появляется ЭДС индукции:

$$\varepsilon_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -L\frac{dI}{dt}. \quad (2.7)$$

Знак минус, обусловленный правилом Ленца, показывает, что наличие ЭДС в цепи приводит к замедлению изменения тока в нем. L – индуктивность контура, которая в общем случае зависит только от геометрической формы контура, его размеров и магнитной проницаемости той среды μ , в которой он находится. В системе СИ L измеряется в *Генри* ($Гн$).

Индуктивность соленоида с числом витков N :

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l}, \quad (2.8)$$

где l – длина соленоида;

S – площадь;

μ – магнитная проницаемость сердечника.

Индуктивность катушки L зависит только от формы, размеров, числа витков катушки и магнитной проницаемости сердечника. Таким образом, наличие индуктивности в электрическом контуре приводит к тому, что контур приобретает своеобразную электрическую инертность, которая выражается в том, что любое изменение тока тормозится сильнее, чем больше L .

Взаимной индукцией называется явление возбуждения ЭДС электромагнитной индукции в одной катушке при изменении электрического тока в другой катушке или при изменении взаимного расположения этих двух катушек.

Рассмотрим две катушки 1 и 2 с токами I_1 и I_2 , расположенные рядом, как в трансформаторе (рис. 2.11).

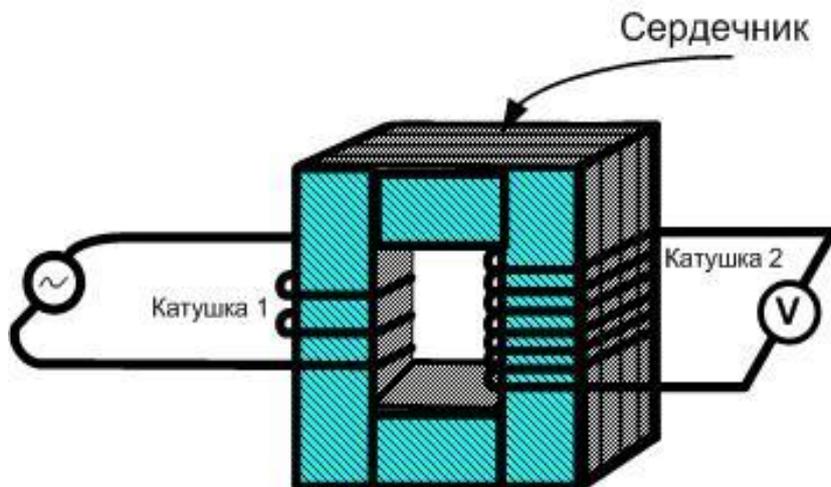


Рисунок 2.11 – Трансформатор

При протекании в катушке 1 тока I_1 магнитный поток пронизывает вторую катушку:

$$d\Phi = L_{21}dI_1;$$

аналогично

$$d\Phi = L_{12}dI_2,$$

где $L_{21} = L_{12}$ – коэффициенты взаимной индукции или взаимная индуктивность. При изменении силы тока в одной из катушек, в другой индуцируется ЭДС:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{12} &= -L_{21} \frac{dI_2}{dt}; \\ \varepsilon_{21} &= -L_{12} \frac{dI_1}{dt}. \end{aligned}$$

Взаимная индуктивность катушек зависит от формы, геометрических размеров, числа витков катушки, магнитной проницаемости сердечника, взаимного расположения катушек. Взаимная индуктивность двух катушек (трансформатора):

$$L = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l}, \quad (2.9)$$

где l – длина сердечника или магнитопровода;
 S – площадь магнитопровода;
 μ – магнитная проницаемость сердечника.

Электрические сопротивления в цепях переменного тока

Электрический ток, изменяющийся со временем, называется переменным. В городской сети переменный ток изменяется со временем по гармоническому закону; такой ток называют периодическим переменным током. Кроме активного сопротивления в цепях переменного тока появляются дополнительные сопротивления; общее название этих сопротивлений – реактивное сопротивление. Реактивное сопротивление бывает двух видов: ёмкостное и индуктивное.

Ёмкостное сопротивление бывает в цепи переменного тока, в которую включили конденсатор с ёмкостью C . Ёмкостное сопротивление равно

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (2.10)$$

где ω – круговая частота;
 C – ёмкость.

Индуктивное сопротивление бывает в цепи переменного тока, в которую включили катушку с индуктивностью L . Индуктивное сопротивление равно

$$X_L = \omega L, \quad (2.11)$$

где ω – круговая частота;
 L – индуктивность.

Если электрическая цепь состоит из последовательного соединения резистора с активным сопротивлением R , конденсатора с ёмко-

стью C и катушки индуктивностью L , то полное сопротивление цепи Z или импеданс цепи равен

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (2.12)$$

где X – реактивное сопротивление цепи. Реактивное сопротивление равно

$$X = X_L - X_C. \quad (2.13)$$

Подставляя значения индуктивного и ёмкостного сопротивления в формулу для полного сопротивления (2.12), получим

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (2.14)$$

Лабораторная работа № 2.2.1

Определение активного сопротивления и индуктивности соленоида

Цель работы: изучение явления самоиндукции и зависимости индуктивности от магнитной проницаемости сердечника.

Приборы и материалы: исследуемый соленоид, два реостата, амперметр астатический, вольтметр постоянного тока, ключ, источники постоянного и переменного тока, соединительные провода.

Экспериментальная установка

Соленоидом или катушкой называют изолированный проводник, намотанный на каркас, по которому течет электрический ток. Соленоид в цепи постоянного тока обладает только активным сопротивлением, которое представляет сопротивление металлического провода – намотка соленоида. Из закона Ома сопротивление равно

$$R = \frac{U}{I} \quad (2.15)$$

Измеряя силу постоянного тока I и падение напряжения U на соленоиде, определяют активное или омическое сопротивление.

В цепи переменного тока сопротивление соленоида будет больше, чем в цепи постоянного тока. Дополнительный вид сопротивления появляется в цепи переменного тока, которое называют *индуктивным сопротивлением*. Возникновение индуктивного сопротивления объясняется тем, что при прохождении переменного тока по катушке (соленоиду) в нем возбуждается ЭДС самоиндукции, которая создает ток самоиндукции, направленный согласно правилу Ленца в каждый данный момент времени против изменения силы тока. Индуктивное сопротивление равно

$$X_{\text{инд}} = \omega L, \quad (2.16)$$

где ω – циклическая частота тока $\omega = 2\pi\nu = 314$ рад/с (для переменного тока промышленной частоты 50 Гц);

L – индуктивность катушки.

Полное сопротивление (импеданс) соленоида Z в цепи переменного тока определяется по теореме Пифагора из омического R и индуктивного ωL сопротивлений

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (2.17)$$

Из формулы (2.12) индуктивность соленоида L равна

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2}. \quad (2.18)$$

В лабораторной работе эмпирическое полное сопротивление соленоида рассчитываем по закону Ома:

$$Z = \frac{U}{i}. \quad (2.19)$$

В цепи переменного тока измеряем силу переменного тока i и падение напряжения U на соленоиде.

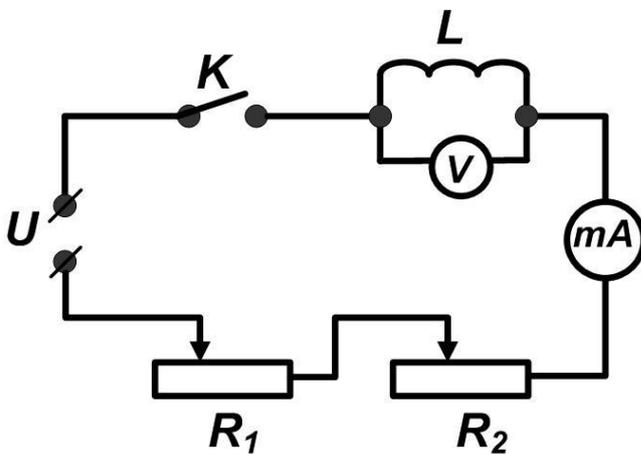
Порядок выполнения работы

Заполните таблицу «Измерительные приборы» и приготовьте таблицы для записи результатов измерений и расчетов.

Задание 1. Определение активного сопротивления R

1. Для измерения омического сопротивления R соленоида собираем цепь по схеме, изображенной на рисунке 2.12 (сердечник вынуть из катушки):

- а) включить вилку в клеммы источника тока с надписью «17 В»;
- б) на амперметре поставить предел измерения 100 мА;
- в) на вольтметре поставить род тока (-) постоянный, а предел измерения – 3 В.



*Рисунок 2.12 –
Электрическая схема установки для определения индуктивности соленоида:
 L – соленоид;
 K – ключ;
 U – источник питания;
 R_1 и R_2 – два реостата;
 V – вольтметр;
 mA – миллиамперметр*

2. Включите источник тока. Изменяя положение ползунков реостата, проведите три измерения силы тока и соответствующего напряжения. Для каждого значения I и U рассчитываем омическое сопротивление R соленоида. Значения записываем в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

№ п/п	I	U	R	R_{cp}	ΔR
Ед. изм.					
1					
2					
3					

Задание 2. Определение полного сопротивления Z

1. Для определения полного сопротивления Z соберите такую же цепь, но с источником переменного тока:

- включить вилку [~ 14 В] источника тока;
- на амперметре поставить предел измерения 100 мА;
- на вольтметре поставить род тока (\sim) переменный, а предел измерения – 3 В.

2. Включите источник тока. Проведите три измерения силы тока и соответствующего напряжения при трех разных положениях ползунков реостата. Для каждого значения I и U рассчитываем полное сопротивление Z соленоида без сердечника.

3. Проведите такие же измерения силы тока и напряжения с сердечником, поставив на вольтметре предел 12 В. Значения запишите в таблицу 2.3.

Таблица 2.3

№ п/п	I	U	Z	$Z_{\text{ср}}$	ΔZ
Ед. изм.					
Без сердечника					
1					
2					
3					
С сердечником					
1					
2					
3					

4. По значениям омического сопротивления R и полного сопротивления Z вычислите индуктивность соленоида с сердечником и без ($L_{\text{ср}}$) по формуле (2.14) и запишите в таблицу 2.4.

5. Вычислите среднеквадратичные погрешности σR и σZ по правилу определения погрешностей прямых измерений.

6. Среднеквадратичную погрешность σL определите по правилу определения погрешностей косвенных измерений:

$$\sigma L = \frac{2}{\omega \sqrt{Z_{\text{ср}}^2 - R_{\text{ср}}^2}} \sqrt{(Z_{\text{ср}} \sigma Z)^2 + (R_{\text{ср}} \sigma R)^2}.$$

Таблица 2.4

№ п/п	Z_{cp}	R_{cp}	L_{cp}	ΔL
Ед.изм.				
Без сердечника				
С сердечником				

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление самоиндукции?
2. Запишите формулу ЭДС самоиндукции.
3. Какова природа сторонних сил ЭДС самоиндукции?
4. Каков физический смысл индуктивности контура? От чего зависит индуктивность контура?
5. Сформулируйте правило Ленца.
6. Полное сопротивление, или импеданс цепи переменного тока.
7. Запишите закон Ома для цепи переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью.

Лабораторная работа № 2.2.2

Измерение полного сопротивления в цепи переменного тока

Цель работы: освоить методы определения реактивного и полного сопротивления в цепях переменного тока.

Приборы и материалы: персональный компьютер и EWB512 – Electronics Workbench.

Задание 1. Измерение индуктивного сопротивления соленоида

1. На персональном компьютере откройте папку EWB512 – Electronics Workbench. В папке выберите файл WEWB32 и откройте его.
2. Соберите виртуальную электрическую цепь, представленную на рисунке 2.13, и предъявите ее на проверку преподавателю.

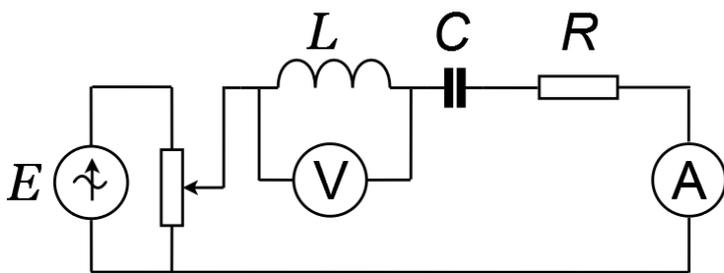


Рисунок 2.13 –

Электрическая схема:

E – источник переменного тока;

A – амперметр;

V – вольтметр;

R – резистор;

L – соленоид;

C – конденсатор

3. Наведите мышку на источник переменного тока и нажмите на левую кнопку на мышке. В окошке выберите «Component Properties» и поставьте значения в «Frequency» 50 Hz. Нажмите ОК. Наведите мышку на потенциометр и нажмите на левую кнопку на мышке. В окошке надо выбрать «Component Properties» и поставьте значения в окошке «Setting» – 0% и «Increment» – 20%. Индуктивность соленоида, емкость конденсатора и сопротивление резистора по заданию преподавателя. Включите ток.

4. Измерьте силу тока и падение напряжения на соленоиде. Измените значение напряжения, меняя положение подвижного контакта на потенциометре нажатием клавиши R на клавиатуре, и снова замерьте силу тока и напряжение. Повторите это действие 5 раз и запишите полученные значения в таблицу 2.5.

5. Рассчитайте экспериментальное индуктивное сопротивление X_L по формуле

$$X_L = \frac{U}{I}.$$

6. Рассчитайте индуктивное сопротивление X_L теоретически по формуле

$$X_L = \omega L.$$

Таблица 2.5

№ п/п	Положение ползунка реостата	I	U	X_L	X_{Lcp}	ΔX_L	X_L теорет.
Ед. изм.							
1	0% R						
2	20% R						
3	40% R						
4	60% R						
5	80% R						
6	100% R						

Задание 2. Измерение ёмкостного сопротивления конденсатора

1. Соберите виртуальную электрическую цепь, представленную на рисунке 2.14, и предъявите ее на проверку преподавателю.

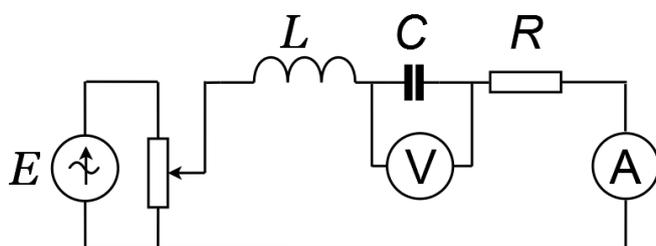


Рисунок 2.14 –

Электрическая схема:

E – источник переменного тока;

A – амперметр;

V – вольтметр;

R – резистор;

L – соленоид;

C – конденсатор

2. Наведите мышку на потенциометр и нажмите на левую кнопку на мышке. В окошке выбрать «Component Properties» и поставить значения «Setting» 0% и «Increment» 20%. Включите ток.

3. Измерьте силу тока и напряжение. Меняйте значение напряжения нажатием клавиши R на клавиатуре 5 раз и запишите полученные значения силы тока и напряжения в таблицу 2.6.

4. Рассчитайте экспериментальное ёмкостное сопротивление X_C по формуле

$$X_C = \frac{U}{I}.$$

5. Рассчитайте ёмкостное сопротивление X_C теоретически по формуле

$$X_c = \frac{1}{\omega C}.$$

Таблица 2.6

№ п/п	Положение ползунка реостата	I	U	X_C	X_{Ccp}	ΔX_C	X_C теорет.
Ед. изм.							
1	0% R						
2	20% R						
3	40% R						
4	60% R						
5	80% R						
6	100% R						

Задание 3. Измерение полного сопротивления (импеданса) цепи переменного тока

1. Соберите виртуальную электрическую цепь, представленную на рисунке 2.15, и предъявите ее на проверку преподавателю.

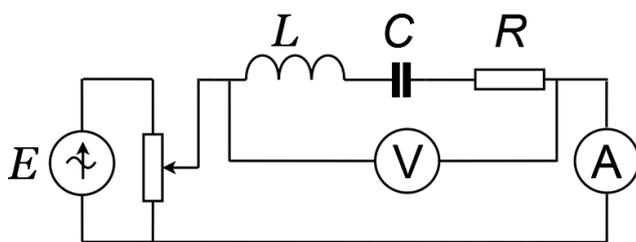


Рисунок 2.15 –

Электрическая схема:

E – источник переменного тока;

A – амперметр;

V – вольтметр;

R – резистор;

L – соленоид

2. Измерьте силу тока и падение напряжения. Полученные значения запишите в таблицу 2.7.

Таблица 2.7

№ п/п	Положение ползунка реостата	I	U	Z	Z_{cp}	ΔZ	Z - теорет.
Ед. изм.							
1	0% R						
2	20% R						
3	40% R						
4	60% R						
5	80% R						

3. Рассчитайте для каждого случая импеданс по формуле $Z = \frac{U}{I}$ пять раз. Найдите среднее значение Z . Найдите отклонение от среднего значения. Рассчитайте ошибку по методу Стьюдента.

4. Рассчитайте теоретическое значение импеданса по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Запишите результат в таблицу 2.7.

5. Сделайте выводы, сравнив эмпирически полученные значения сопротивлений и теоретические значения, рассчитанные по формулам.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение электрического сопротивления. Какие виды сопротивления бывают в цепи постоянного тока и переменного?

2. Запишите формулу активного сопротивления однородного металлического проводника.

3. Запишите формулу ёмкостного сопротивления конденсатора. Какой физический смысл ёмкостного сопротивления?

4. Запишите формулу индуктивного сопротивления катушки. Какой физический смысл индуктивного сопротивления?

5. Запишите формулы реактивного сопротивления и полного сопротивления цепи переменного тока.

6. Векторная диаграмма электрических напряжений. Как найти результирующее колебание напряжений? Покажите на графике взаимное расположение фазового угла φ , активное сопротивление R , реактивное сопротивление X и импеданс Z .

Лабораторная работа № 2.2.3

Знакомство с принципом действия однофазного индукционного счетчика переменного тока

Цель работы: изучить устройство и принцип действия счетчика электрической энергии.

Приборы и материалы: амперметр переменного тока на 5 А, вольтметр переменного тока на 300 В, электрический счетчик, электроплитка, реостаты, ключ, секундомер, соединительные провода.

Экспериментальная установка

На рисунке 2.16 показано схематическое устройство однофазного счетчика активной энергии. При прохождении тока по катушкам 3 и 4 создаются два магнитных поля, пронизывающих диск 1. Так как проходящий по катушкам ток – переменный, то и создаваемые им магнитные поля также являются переменными. Изменяющиеся магнитные поля наводят в диске 1 индукционные токи. Взаимодействие индукционных токов, наведенных в диске 1, с магнитными полями катушек приводит к возникновению механической силы, приводящей диск во вращение.

Вращающий момент, испытываемый диском, пропорционален средней мощности, потребляемой цепью. При вращении диск проходит между полюсами постоянного магнита 2, в результате чего в диске наводятся токи Фуко. Взаимодействие этих токов с полем магнита создает тормозящую силу. При достижении определённого числа оборотов диска в единицу времени, при котором наступает ра-

венство вращающего и тормозящего моментов, диск будет вращаться равномерно.

С увеличением нагрузки увеличивается вращающий момент, приводящий к увеличению скорости вращения диска, благодаря чему увеличивается и тормозящий момент. Следовательно, снова наступает равновесие между вращающим и тормозящим моментами. Счетный механизм, соединенный с осью диска, подсчитывает полное число оборотов N диска за время t работы счетчика.

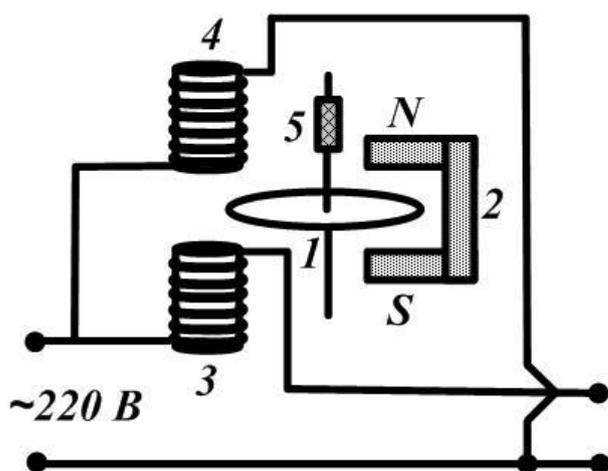


Рисунок 2.16 –
Схема индукционного
счетчика:
1 – диск;
2 – постоянный маг-
нит;
3, 4 – электромагниты;
5 – подпятник

Полное число оборотов диска N пропорционально энергии W , потребляемой цепью:

$$W = AN = Ant, \quad (2.20)$$

где n – скорость вращения диска. Число оборотов в секунду равно

$$n = \frac{N}{t}. \quad (2.21)$$

A – постоянная счетчика (величина энергии тока, приходящаяся на один оборот диска), которая определяется из обозначений на его лицевой стороне, например, если на счетчике обозначено 1 кВт-час – 400 об, то постоянная счетчика равна

$$A = \frac{1 \text{ кВт} \cdot \text{час}}{400 \text{ об}} = \frac{1000 \text{ Вт} \cdot 360 \text{ с}}{400 \text{ об}} = 900 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{об}}.$$

Расходуемая в цепи электроэнергия W_g будет равна

$$W_g = A_g N, \quad (2.22)$$

где A_g – действительная постоянная счетчика, определяемая опытным путем:

$$A_g = \frac{W_g}{N} = \frac{Pt}{N} = \frac{P}{n}; \quad (2.23)$$

а P – средняя мощность цепи, которая определяется при помощи вольтметра и амперметра:

$$P = I \cdot U. \quad (2.24)$$

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь по схеме на рисунке 2.17. Определите постоянную счетчика A , исходя из обозначений на лицевой стороне счетчика, и запишите показание счетчика в таблицу 2.8.

2. Установите с помощью реостатов максимальное сопротивление цепи, замкните цепь и отметьте показания амперметра и вольтметра. Запишите показание счетчика в таблицу 2.9.

3. Определите скорость вращения диска по формуле (2.21). Для этого отсчитывайте 30-40 оборотов диска, время определяйте по секундомеру. Опыт повторите трижды. Данные занесите в таблицу 2.9.

4. Запишите показания счетчика по окончании опыта в таблицу 2.8.

5. Затем вычислите действительную постоянную счетчика по формуле израсходованной энергии по показаниям счетчика:

$$A_g = \frac{P}{n_{cp}}.$$

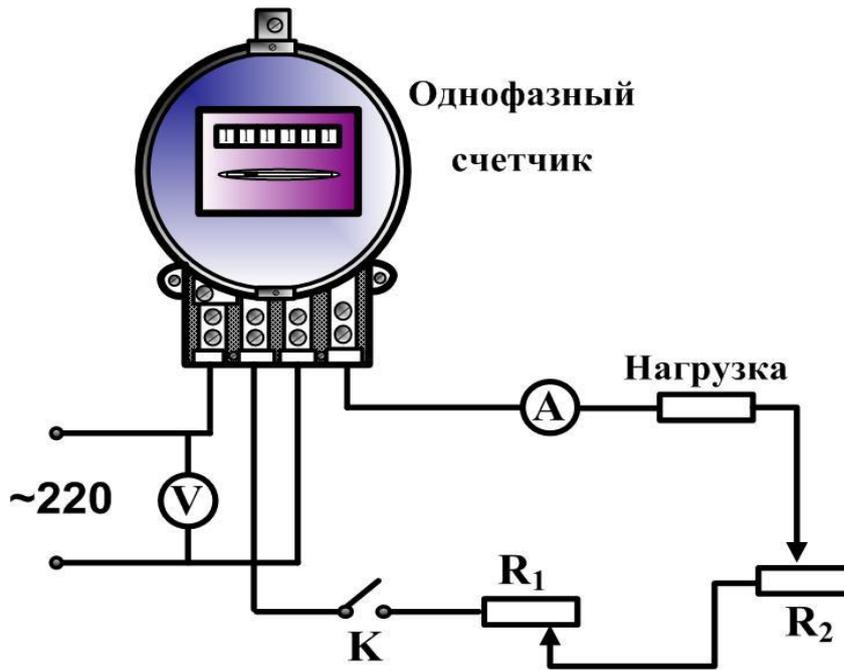


Рисунок 2.17 –
Электрическая
схема включения
счетчика:

V – вольтметр
переменного
тока;

A – амперметр;
 R_1, R_2 – реоста-
ты;

«Нагрузка» –
электроплитка

6. Полученные данные занесите в таблицу 2.10. Абсолютную погрешность ΔA рассчитайте по правилу определения погрешностей прямых измерений.

Таблица 2.8

	Показания счетчика
Ед. изм.	
До опыта	
По окончании опыта	

Таблица 2.9

Нагрузка	№ п/п	I	U	P	N	t	n	$n_{ср}$
Ед. изм.								
Сопротивление цепи max	1							
	2							
	3							
Сопротивление цепи min	1							
	2							
	3							

Таблица 2.10

№ п/п	Нагрузка	A	A_g	A_{gcp}	ΔA_{gcp}	W_g	W
	Ед. изм.						
1	Сопротивление цепи <i>max</i>						
2	Сопротивление цепи <i>min</i>						

7. Сделайте выводы, сравнив эмпирически полученные данные с показаниями счетчика.

Контрольные вопросы

1. Начертите схему устройства счетчика.
2. Объясните, как создается вращающий момент диска.
3. Что произойдет, если клеммы 2 и 4 замкнуть (замкнуть проводником)?
4. Объясните, как достигается равномерность вращения диска.
5. Что определяет «постоянная» счетчика?
6. Запишите формулы работы и мощности тока и назовите единицы измерения.

ТЕМА 2.3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

Магнитными свойствами обладают все вещества. Поэтому всякое вещество является магнетиком. Согласно гипотезе Ампера в любом теле существуют микроскопические токи, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах. Эти микроскопические токи создают собственное магнитное поле B_c , поэтому магнитная индукция B в среде отличается от индукции B_0 внешнего магнитного поля в той же точке пространства в отсутствие среды, т.е. в вакууме.

$$\bar{B} = \bar{B}_0 + \bar{B}_c.$$

Микроскопические токи под действием внешнего магнитного поля определенным образом ориентируются: чем больше индукция B_0 , тем больше индукция собственного магнитного поля среды:

$$\bar{B}_c = \chi \bar{B}_0,$$

где χ – магнитная восприимчивость среды. Вектор собственной магнитной индукции среды может быть как сонаправлен с вектором магнитной индукции внешнего поля, так и противоположен ему.

По действию магнитного поля материалы делятся на следующие типы: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Диамагнетики – вещества, ослабляющие магнитное поле; их магнитная проницаемость меньше единицы ($\mu < 1$, например $\mu \approx 0,998$). Для диамагнетика $\chi < 0$, при этом $|\chi| < 1$. Такими веществами являются фосфор, сера, сурьма, углерод, металлы (*Bi, Hg, Au, Cu* и др.), большинство химических соединений (H_2O и почти все органические соединения). Диамагнетик – вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля, направленный противоположно вектору магнитной индукции внешнего поля, значительно меньше его по модулю:

$$\bar{B}_c \updownarrow \bar{B}_0;$$

$$\bar{B}_c \ll \bar{B}_0.$$

Парамагнетики – вещества, усиливающие внешнее магнитное поле; их магнитная проницаемость больше либо равна единице ($\mu \geq 1$). Для парамагнетика $\chi < 0$, при этом $|\chi| \approx 1$. Парамагнетиками являются газы (O_2, N_2) и щелочные и щелочноземельные металлы (Al, W, Pt). Парамагнетик – вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля, сонаправленный с вектором магнитной индукции внешнего поля, меньше его по модулю:

$$\bar{B}_c \uparrow \bar{B}_0;$$

$$\bar{B}_c < \bar{B}_0.$$

Ферромагнетики – это вещества, которые очень сильно усиливают внешнее магнитное поле ($\mu \gg 1$). Для ферромагнетика $\chi > 0$, при этом $|\chi| \gg 1$. Ферромагнетики – это Fe, Ni, Co, Dy , сплавы и окислы этих металлов, некоторые сплавы марганца и хрома.

Ферромагнетики обладают доменной структурой. Домен – это область, в которой атомы обладают параллельной ориентацией спинов. В макроскопическом образце ферромагнетика находится много доменов размером порядка 0,5 мкм. При приложении к ферромагнетiku внешнего магнитного поля происходит поворот доменов в направлении B_0 и их рост. При увеличении индукции B_0 внешнего поля в результате выстраивания доменов возрастает собственная индукция B_c ферромагнетика.

Намагниченность – магнитный момент единицы объема магнетика:

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V},$$

где $\vec{P}_m = \sum \vec{p}_a$ – магнитный момент магнетика (векторная сумма магнитных моментов отдельных молекул). Магнитный момент $\vec{P}_m = Is$. Намагниченность J определяет величину магнитного поля вещества B_c . Индукция магнитного поля, возникающего при намагничивании вещества, равна

$$B = \mu_0 J. \quad (2.25)$$

Ферромагнетики – это вещества, обладающие спонтанной намагниченностью: они остаются намагниченными (постоянные магниты) после удаления внешнего магнитного поля ($\vec{P}_m = \sum \vec{p}_a \neq 0$). Существенная особенность ферромагнетиков – не только большие значения μ (например, для железа – 5000), но и зависимость μ от H . Вначале μ растет с увеличением H , затем, достигая максимума, начинает уменьшаться, стремясь в случае сильных полей к единице.

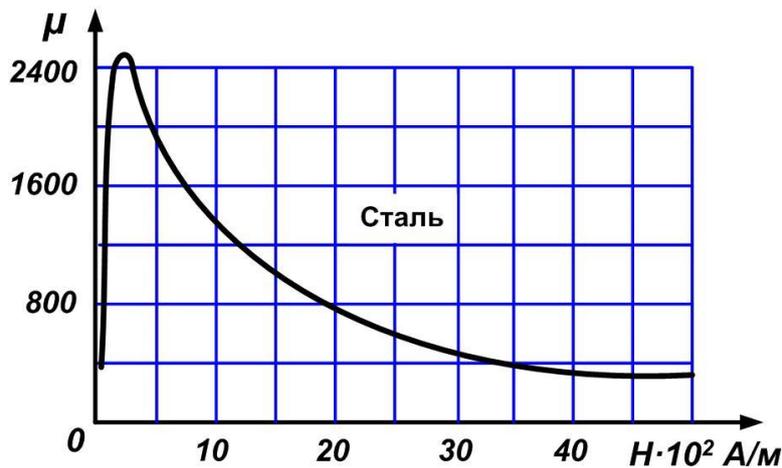


Рисунок 2.18 –
Зависимость магнитной проницаемости μ ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля H

Это приводит к сложной зависимости намагниченности J и индукции магнитного поля B ферромагнетика от напряженности внешнего поля. По мере возрастания H величина J и B сначала растет быстро, затем медленнее и, наконец, достигает так называемого магнитного насыщения $J_{нас.}$. Это можно объяснить тем, что по мере увеличения намагничивающего поля увеличивается степень ориентации магнитных моментов по полю. Этот процесс начнет замедляться, когда останется все меньше и меньше неориентированных моментов. Наконец, когда все моменты будут ориентированы по полю, дальнейшее увеличение J прекратится и наступит магнитное насыщение.

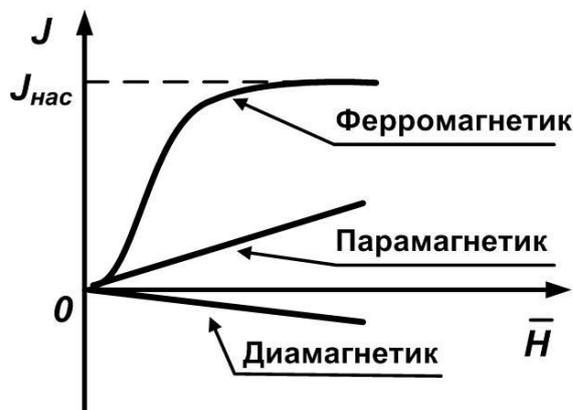


Рисунок 2.19 –
Зависимость намагниченности вещества J от напряженности внешнего магнитного поля H для разных магнитных материалов

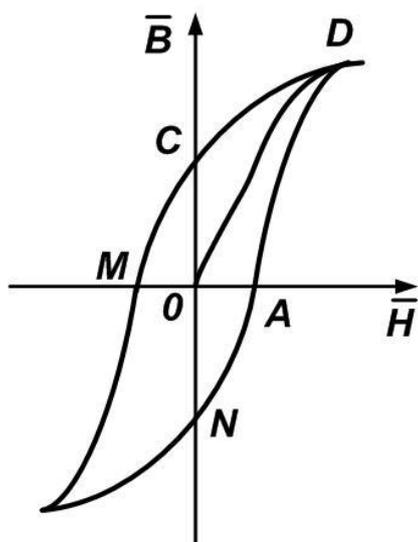


Рисунок 2.20 –
Петля гистерезиса.
 MO – коэрцитивная сила ферромагнетика;
 OC – остаточная намагниченность;
линия OD – линия, вдоль которой происходит начальное намагничивание

Петля гистерезиса ферромагнетика – это замкнутая кривая, по которой происходит периодическое изменение намагниченности и индукции образца вслед за изменяющимся магнитным полем (рис. 2.20). Значение OC – остаточная индукция (индукция магнитного поля ферромагнетика при отсутствии внешнего магнитного поля). OA – коэрцитивная сила ферромагнетика – значение магнитного поля, необходимое для размагничивания ферромагнетика. Точка D – напряженность внешнего поля, при которой достигается максимальная намагниченность ферромагнетика. Линия OD – кривая намагничивания ферромагнетика (линия, вдоль которой происходит намагничивание полностью размагниченного ферромагнетика). Площадь петли гистерезиса прямо пропорциональна потерям энергии на гистерезисные явления (работа по перемагничиванию ферромагнетика) и вихревые токи (токи Фуко).

Лабораторная работа № 2.3.1 Изучение петли гистерезиса ферромагнетика

Цель работы: ознакомиться с работой осциллографа, а также изучить физические свойства ферромагнетика.

Приборы и материалы: тороидальный образец ферромагнетика, осциллограф, амперметр (миллиамперметр), вольтметр цифровой, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), интегрирующая цепочка RC , ключ, регулируемое сопротивление R (реостат). На образце имеются: намагничивающая обмотка n_1 и измерительная обмотка n_2 .

Экспериментальная установка

Осциллограф – это прибор, предназначенный для исследования и регистрации электрических процессов. Блок-схема (рис. 2.21) простейшего осциллографа состоит из следующих элементов:

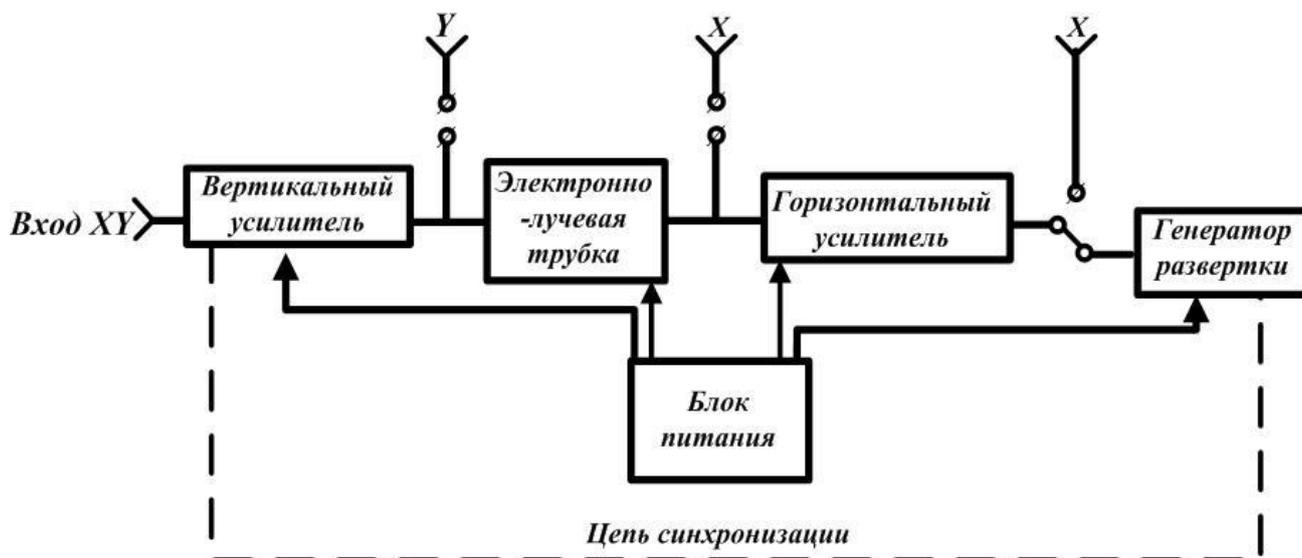


Рисунок 2.21 – Блок-схема осциллографа

Одним из основных элементов осциллографа является электронно-лучевая трубка, в которой узкий пучок летящих электронов проходит через две пары пластин (пластины «X» и пластины «Y») и вызывает свечение экрана. Пластины «X» и пластины «Y» расположены перпендикулярно друг другу. Если подавать на эти пластины напряжение, луч опишет на экране кривую, называемую осциллограммой. Для получения осциллограмм, изображающих зависимость напряжения от времени, необходим генератор горизонтальной развертки. Это генератор пилообразного напряжения, которое подается на горизонтально отклоняющие пластины «X» и может меняться по амплитуде и частоте.

Исследуемый сигнал можно подавать либо непосредственно на пластины «X» или «Y», либо через вертикальный и горизонтальный усилители.

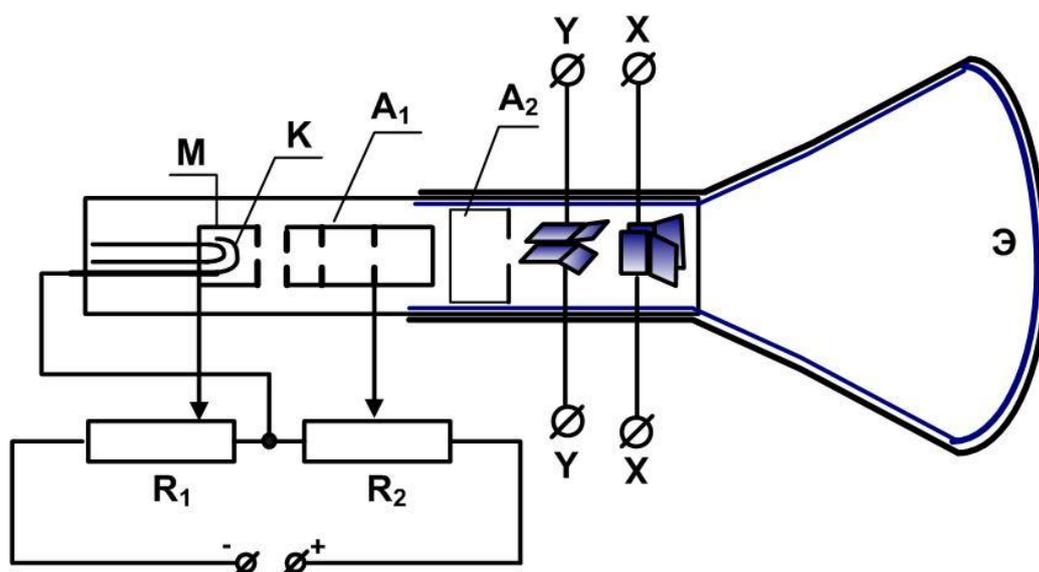


Рисунок 2.22 – Электронно-лучевая трубка с электростатическим управлением

Электронно-лучевая трубка с электростатическим управлением состоит из вакуумной колбы цилиндрической формы с расширением к одному концу в виде конуса (рис. 2.22). Экран трубки Э покрыт слоем люминофора (вещество, которое светится при ударе каждого электрона). Электроны, вылетевшие с катода K под разными углами к его поверхности, попадают в электрическое поле цилиндра M , окружающего катод (модулятора), или, как его еще иначе называют, управляющего электрода, имеющего отрицательный потенциал относительно катода. Этим полем поток электронов сжимается и направляется в отверстие модулятора. Интенсивность пучка, а следовательно и яркость светящегося на экране пятна можно регулировать с помощью потенциометра R_1 , т.к. поле управляющего электрода помимо сжимающего действия на поток электронов оказывает еще и тормозящее действие. При достаточно большом отрицательном потенциале модулятора можно совсем «погасить» пучок. После модулятора электронный пучок попадает в электрическое поле первого анода, или, как его еще называют, фокусирующего цилиндра. На него подается положительное относительно катода напряжение порядка нескольких сот вольт. Это поле ускоряет электроны в пучке и, благодаря своей конфигурации, сжимает электронный пучок. Таким образом, фокусировка луча достигается изменением потенциала первого анода с помощью потенциометра R_2 . Второй анод в виде короткого цилиндра располагают непосредственно за первым анодом и подают на него

более высокое положительное напряжение (1–5 кВ). Этот анод называют еще ускоряющим анодом. В результате электронам сообщается достаточная скорость, чтобы вызвать свечение экрана, а благодаря фокусировке на экране получается светящаяся точка. Система электродов *катод – модулятор – первый анод – второй анод* образуют так называемую электронную пушку. Далее расположены две пары параллельных пластин. Одна из них установлена горизонтально, а другая вертикально. Если к пластинам «Х» и «У» приложить разность потенциалов, то электронный луч будет отклоняться в горизонтальном или вертикальном направлениях. Таким образом, претерпев на своем пути два взаимно перпендикулярных отклонения, электронный луч может быть направлен в любую точку экрана. При отсутствии отклоняющих напряжений на пластинах электронный луч попадает в центр экрана. Если на вертикально отклоняющие пластины «У» электронно-лучевой трубки подать переменное напряжение, то электронный луч начнет колебаться в вертикальном направлении и оставит на экране трубки светящуюся вертикальную линию. Если же переменное напряжение подать только на горизонтально отклоняющие пластины «Х», то на экране получится горизонтальная светящаяся линия. При одновременном воздействии переменных напряжений на обе пары пластин в зависимости от соотношения их частот, амплитуд и фаз можно получить различные осциллограммы.

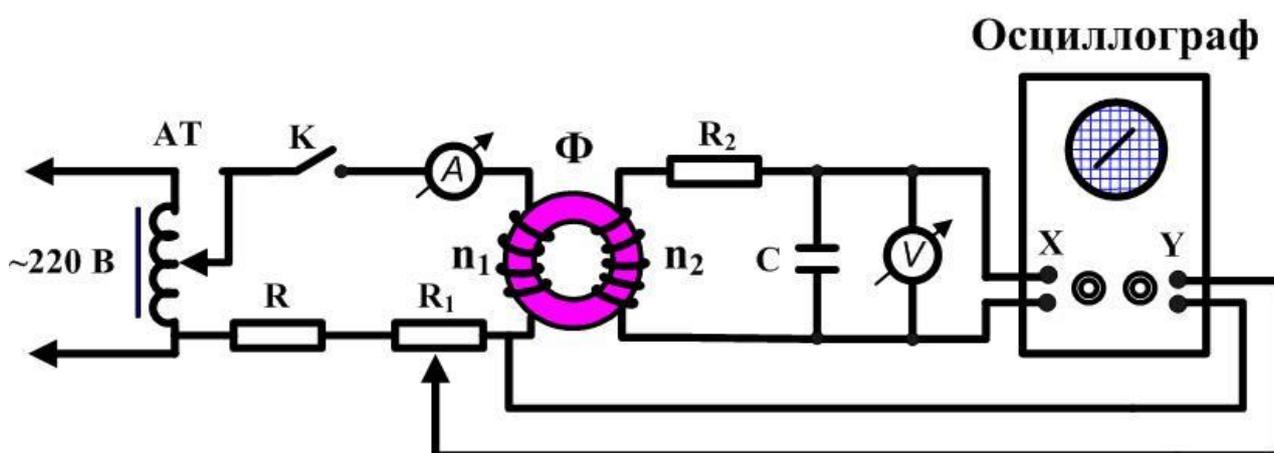


Рисунок 2.23 – Электрическая схема установки:

K – ключ; *R* – реостаты; *A* – амперметр для переменного тока;
Φ – ферромагнитный тороидальный сердечник с двумя обмотками;
*n*₁ – число витков на первой обмотке; *n*₂ – число витков на второй обмотке; *C* – конденсатор; *V* – вольтметр

На рисунке 2.23 показано схематическое устройство лабораторной установки. Через лабораторный автотрансформатор AT подается переменное напряжение на катушку Φ . Первичная обмотка питается переменным током I_1 через реостаты R . Ток создает внутри тороидального сердечника меняющееся по величине и знаку магнитное поле. Напряженность этого поля в каждый момент времени пропорциональна силе тока:

$$\overline{H} = n_1 I_1,$$

где $n_1 = 56$ – число витков на первой обмотке. Ток I_1 протекает по реостату R и создает падение напряжения на нем:

$$U_x = I_1 R = \frac{R}{n_1} H,$$

где U_x – падение напряжения, которое подается на горизонтальные пластины осциллографа. Падение напряжения на реостате, пропорциональное напряженности магнитного поля H , направляют на горизонтальные пластины осциллографа. Во второй обмотке тороида источником тока является ЭДС индукции, возникающая вследствие изменения магнитного потока в сечении тороида с течением времени. По закону Фарадея

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt},$$

где Φ – поток вектора магнитной индукции через площадь вторичной обмотки. Он равен

$$\Phi = B S n_2,$$

где s – площадь поперечного сечения сердечника;

$n_2 = 155$ – число витков на второй обмотке. Следовательно

$$\varepsilon_i = -S n_2 \frac{dB}{dt}.$$

ЭДС индукции пропорционально скорости изменения магнитной индукции. Для получения падения напряжения U_y , пропорционального B , в цепь вторичной обмотки включен конденсатор C и резистор R (интегрирующая цепь). По определению сила тока во вторичной цепи равна

$$I_2 = \frac{dq}{dt}.$$

Отсюда заряд, накапливающийся на конденсаторе, равен

$$q = \int I_2 dt.$$

Закон Ома для вторичной цепи, в которой действует ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = U_C + I_2 R_2,$$

где U_C – напряжение на конденсаторе в данный момент времени:

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{\int I_2 dt}{C}.$$

Если сопротивление R_2 велико, то первым слагаемым U_C в формуле можно пренебречь в сравнении со вторым $I_2 R_2$. Тогда можно записать

$$I_2 = -\frac{Sn_2}{R_2} \frac{dB}{dt} \Rightarrow U_C = -\frac{Sn_2}{R_2 C} \int dB = -\frac{Sn_2}{R_2 C} B.$$

Напряжение на конденсаторе, пропорциональное индукции магнитного поля B , подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа ($U_C = U_y$). Таким образом, на одни пластины подается напряжение, пропорциональное H , а на другие пластины – пропорциональное B в тот же момент времени. В результате на экране получится петля гистерезиса.

Величины H (в амперах на метр) и B (в теслах) можно получить, зная цену деления сетки осциллографа c_x по оси X и c_y по оси Y , которая измеряется в вольтах и показывает величину напряжения, отклоняющего световое пятно на экране на одно деление. Зная цену деления, можно определить напряжение по формулам

$$H = k_1 n_x;$$

$$B = k_2 n_y,$$

где

$$k_1 = \frac{n_1 c_x}{R_1};$$

$$k_2 = \frac{R_2 C c_y}{S n_2}.$$

При вычислении постоянных k_1 и k_2 следует n_1 подставить в витках на метр, R_1 и R_2 – в омах, C – в фарадах, c_x и c_y – в вольтах на деление, S – в квадратных метрах, n_2 – полное число витков вторичной обмотки. Тогда H будет выражаться в А/м, а B в Тл.

Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы необходимо проверить соответствие монтажа установки ее принципиальной схеме, ознакомиться с ее элементами и приборами. Лабораторную установку характеризуют следующие параметры: число витков намагничивающей обмотки $n_1 = 56$; число витков измерительной обмотки $n_2 = 155$; сечение образца $S = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; длина средней линии тороида образца $\ell = 0,14 \text{ м}$; частота перемагничивания $f = 50 \text{ Гц}$.

2. Перед тем как включить установку в сеть, проверьте ручку ЛАТРа – она должна быть установлена на нуле. Замкните ключ K и, плавно вращая ручку ЛАТРа, установите в намагничивающей цепи ток $I_m = 0,1 \text{ А}$.

3. Реостатом R_I и ручками управления осциллографа установите на экране изображение петли гистерезиса симметрично относительно центра координатной сетки, подобрав по осям X и Y размеры петли, удобные для измерения.

4. Зарисуйте петлю в тетрадь. Запишите в таблицу 2.11 число делений на экране осциллографа для MO (коэрцитивная сила ферромагнетика) (см. рис. 2.20), H_m (максимальное значение напряженности магнитного поля, соответствует точке D), OC (остаточная намагниченность), B_m (максимальное значение индукции магнитного поля, соответствует точке D).

5. Измерьте напряжение $U_m(B)$, развиваемое в измерительной обмотке n_2 . Для измерения используйте шкалу осциллографа.

6. По формулам (2.26) и (2.27) рассчитайте H_m , B_m в единицах СИ:

$$H = \frac{\sqrt{2}In_1}{\ell}; \quad (2.26)$$

$$B = \frac{U}{(4fn_2S)}. \quad (2.27)$$

7. Определите масштабы по осям X и Y в единицах $\frac{A}{м \cdot мм}$ и $\frac{Tл}{мм}$ соответственно. Используя этот масштаб по рисунку, найдите величины MO и OC . Полученные данные занесите в таблицу 2.11.

Таблица 2.11

$I (A)$	Единица измерения	U	H_m	B_m	MO	OC
0,1	В делениях					
	В един. сист. СИ					
0,05	В делениях					
	В един. сист. СИ					

8. Рассчитайте магнитную проницаемость для разных токов по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}, \quad (2.28)$$

где μ_0 – магнитная постоянная

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}.$$

9. Рассчитайте потери по формуле

$$P = \frac{4 \cdot f \cdot S \cdot \ell}{\sqrt{2}} \cdot B \cdot H, \quad (2.29)$$

где $f = 50$ Гц;

$$S = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$\ell = 0,14 \text{ м}.$$

10. Сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения: магнитное поле, напряженность, индукция магнитного поля.
2. Охарактеризуйте диамагнетики: какие значения принимает их магнитная проницаемость? Каковы причины диамагнетизма?
3. Охарактеризуйте парамагнетики: какие значения принимает их магнитная проницаемость? Каковы причины парамагнетизма?
4. Охарактеризуйте ферромагнетики: какие значения принимает их магнитная проницаемость? Как она зависит от величины внешнего поля? Приведите примеры материалов.
5. Как зависят намагниченности диа-, пара- и ферромагнетиков от величины намагничивающего поля?
6. Нарисуйте петлю гистерезиса ферромагнетика, дайте определения особых точек. От чего зависит ширина петли?
7. Что является причиной потерь энергии при перемагничивании металлического ферромагнетика?

ЛИТЕРАТУРА

1. Иродов, И.Е. Основные законы электромагнетизма: учеб. пособие для высших учебных заведений / И.Е. Иродов. – М.: Высшая школа, 1991.
2. Савельев, И.В. Курс физики: учеб. пособие для высших учебных заведений: в 2 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1988.
3. Сорокин, Б.П. Электрические колебания, оптика, квантовая природа излучения, атомная физика: лабораторный практикум / Б.П. Сорокин, И.В. Серюкова, Т.П. Сорокина [и др.]. – Красноярск, 2009.
4. Мисюль, С.В. Введение в лабораторный практикум / С.В. Мисюль, Р.П. Смолин. – Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2006.
5. Серюкова, И.В. Физика: электронный учебно-методический комплекс / И.В. Серюкова. – Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2006.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Методические указания

*Ольга Ильинична Наслузова
Ирина Владимировна Серюкова*

Электронное издание

Редактор Е.А. Андреева

Подписано в свет 29.08.2016. Регистрационный номер 1
Редакционно-издательский центр Красноярского государственного аграрного университета
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117
e-mail: rio@kgau.ru