

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие
по курсу
«Общая физика»
для студентов, обучающихся по направлениям
«Теплоэнергетика и теплотехника»,
«Ядерная энергетика и теплофизика»,
«Энергетическое машиностроение»

Под редакцией А.Т. Комова

Москва
Издательство МЭИ
2015

УДК 537
К 937

*Утверждено учебным управлением МЭИ
в качестве учебного пособия для студентов*
Подготовлено на кафедре общей физики и ядерного синтеза

Рецензенты: канд. техн. наук, доц каф. физики МГТУ им. Н.Э. Баумана
А.Г. Андреев, канд. техн. наук, доц. каф. ОФияС НИУ «МЭИ» П.П. Щербаков

Авторы: А.Т. Комов, С.Д. Федорович, А.В. Дедов, А.А. Барат, Г.С. Бочаров

Комов, А.Т.

К 937 Электричество и магнетизм. Лабораторный практикум: учебное пособие / А.Т. Комов, С.Д. Федорович, А.В. Дедов [и др.]; под ред. А.Т. Комова. — М.: Издательство МЭИ, 2015. — 120 с.

ISBN 978-5-7046-1610-8

В пособии обобщен опыт создания современного лабораторного практикума по разделу «Электричество и магнетизм» кафедры общей физики и ядерного синтеза МЭИ.

Практикум построен по принципу сочетания тематической фронтальности, индивидуального метода обучения и элементов научного исследования. Практикум сопровождается программным обеспечением для обработки результатов экспериментов, установленным на каждом рабочем месте учебной лаборатории.

Для студентов ИТАЭ, ИПЭФ, ЭнМИ НИУ «МЭИ», обучающихся по направлениям «Теплоэнергетика и теплотехника», «Ядерная энергетика и теплофизика» и «Энергомашиностроение».

УДК 537

ISBN 978-5-7046-1610-8

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие содержит двенадцать лабораторных работ по электричеству и магнетизму, которые выполняются студентами первого и второго курса в физической лаборатории. Выполнение каждой лабораторной работы рассчитано на два академических часа и требует не менее двух часов самостоятельной подготовки студентов.

В вводной работе рассматриваются общие вопросы измерения электрических величин и оценки погрешностей электрических измерений. Полученные знания закрепляются при выполнении лабораторной работы по измерению основных параметров периодических электрических сигналов.

Лабораторные работы по разделу «Электричество» ориентированы на изучение электростатических полей в вакууме и диэлектриках, знакомство с методами измерения электрической емкости конденсаторов и изучение закона Ома для неоднородного участка электрической цепи.

В лабораторных работах по магнетизму изучаются магнитные поля в вакууме и ферромагнетиках, движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, силы, действующие на проводник, и момент сил на контур с током в магнитном поле. Электрические колебания изучаются при исследовании последовательного колебательного контура, рассматриваются затухающие и вынужденные колебания.

Основное внимание при выполнении лабораторных работ уделяется более глубокому усвоению фундаментальных понятий и практическому применению физических эффектов.

В практической реализации лабораторного практикума использован и обобщен многолетний методический опыт кафедры общей физики и ядерного синтеза. Физическая лаборатория оснащена современным оборудованием и электронными измерительными приборами.

Лабораторные работы могут выполняться по методу тематической фронтальности.

Особенностью данного лабораторного практикума является то, что он предназначен для использования в двух учебных лабораториях, в которых нередко существенно различаются оборудование лабораторных установок и используемые приборы. Поэтому, с целью сохранения единства описания, раздел «Порядок выполнения работы» отличается некоторой общностью, а конкретные особенности, данные по

используемому оборудованию и приборам, указаны непосредственно на установке.

Кроме того, в этом методическом пособии уделено особое внимание выработке у студентов навыков графического представления результатов измерений на физическом оборудовании и методов оценки погрешности измерений, представленных графически. В Приложении приведены материалы по методам расчета погрешностей, изложенных в полном объеме в учебном пособии «Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Лабораторный практикум». Авторы выражают искреннюю признательность В.В. Манухину за возможность частичного использования вышеуказанных методов расчетов в данном пособии.

Большое внимание уделяется статистической обработке результатов измерений. Настоящее пособие сопровождается компьютерным лабораторным практикумом по разделу «Электричество и магнетизм», который оказывает студентам существенную помощь при подготовке к лабораторным работам и обработке результатов измерений.

Авторы выражают глубокую благодарность ассистенту Ю.В. Сморчковой за помощь, оказанную при подготовке к изданию, доцентам В.С. Спиваку и П.П. Щербакову за внимательное прочтение рукописи и полезные замечания, а также О.В. Губаревой за неоценимую техническую помощь.

ВВОДНАЯ РАБОТА

ИЗМЕРЕНИЕ И РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Цель работы — измерение электрических величин с помощью электроизмерительных приборов, расчет погрешностей электрических измерений; наблюдение периодических электрических сигналов с помощью электронного осциллографа.

1. Теоретические основы работы

Электрические методы измерения и измерительная техника, в том числе цифровая, позволяют определить практически любую физическую величину при наличии соответствующего преобразователя. Благодаря созданию электротехнических устройств, преобразующих неэлектрические величины в электрические (преобразователей), электрические методы измерения используются при измерении практически всех физических величин. Средства измерений — технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические свойства.

Методы и средства измерения в цепях переменного и постоянного тока существенно различаются. В цепях переменного тока они зависят от частоты и характера изменения величин.

Для измерения электрических величин применяются аналоговые и цифровые приборы. Аналоговые вольтметры и амперметры являются электромагнитными приборами. В цепях постоянного тока используются приборы магнитоэлектрического типа, принцип действия которых основан на взаимодействии рамки с током с магнитным полем постоянного магнита. Величина этого взаимодействия пропорциональна измеряемой величине.

Для измерения электрических величин в цепях переменного тока применяются аналоговые электромагнитные приборы, принцип действия которых основан на взаимодействии магнитного поля с сердечником из ферромагнитного материала.

В настоящее время широкое распространение получили цифровые электронные измерительные приборы, в которых аналоговый электрический сигнал преобразуется в цифровую форму. Такие приборы являются, как правило, многопредельными и позволяют измерять

электрические величины как постоянного, так и переменного тока. Многофункциональные цифровые измерительные приборы называются мультиметрами.

Для визуального наблюдения и измерения параметров электрических сигналов применяются электронные осциллографы. Осциллографы позволяют наблюдать как периодические сигналы, так и одиночные импульсы произвольной формы.

Расчет погрешностей электрических измерений существенно отличается от расчета погрешностей механических величин.

Погрешность стрелочных аналоговых электроизмерительных приборов определяется их классом точности. Класс точности — это относительная погрешность измерения, выраженная в процентах от установленного предела измерения прибора. Класс точности указывается на шкале или в паспорте прибора. ГОСТ установлены следующие классы точности измерительных приборов: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0.

Абсолютная погрешность измерения физической величины, например, напряжения, определяется по формуле

$$\Delta U = \pm U_{\text{п}} K / 100,$$

где K — класс точности; $U_{\text{п}}$ — предел, на котором производятся измерения.

Относительная погрешность рассчитывается по формуле

$$\delta U = \pm \Delta U / U_x,$$

где U_x — показания прибора при измерении данной физической величины.

Пусть прибором с классом точности 1,5 получено на пределе $U_{\text{п}} = 10$ В значение измеренной величины напряжения $U_x = 3,5$ В, тогда абсолютная погрешность измерения составит

$$\Delta U = \pm U_{\text{п}} \cdot K / 100 = \pm 10 \cdot 1,5 / 100 = \pm 0,15 \text{ В},$$

а относительная погрешность составит

$$\delta U = \pm \Delta U / U_x = \pm 0,15 / 3,5 = \pm 0,043 \text{ или } \pm 4,3 \text{ \%}.$$

Погрешности измерения цифровыми приборами рассчитываются по формулам, которые приводятся в их технической документации. Причем эти формулы различны для разных измеряемых величин и пределов измерения.

Например, для цифрового вольтметра В7-38 при измерении напряжения постоянного тока на пределах 20 и 200 В предел допускаемой основной погрешности определяется по формуле

$$\delta U = \pm \left(0,07 + 0,02 \frac{U_{\text{п}}}{U_x} \right) \%.$$

При измерении вольтметром В7-38 такого же значения напряжения $U_x = 3,5$ В, что измерялось аналоговым прибором, получим:

$$\delta U = \pm \left(0,07 + 0,02 \frac{20}{3,5} \right) = \pm 0,18 \%;$$

$$\Delta U = \pm 3,5 \cdot 0,0018 = 0,0065 \text{ В.}$$

Для цифрового вольтметра типа GDM-8245 (табл. 4) при измерении напряжения постоянного тока предел допускаемой абсолютной погрешности определяется по формуле

$$\Delta U = \pm (0,0003U + 4k),$$

где U — измеренное значение напряжения; k — параметр, зависящий от выбранного предела измерений.

При измерении переменного напряжения частотой 45—1000 Гц этим же вольтметром предел допускаемой абсолютной погрешности определяется по формуле

$$\Delta U = \pm (0,005U + 15k),$$

где U — измеренное значение напряжения; k — параметр, зависящий от выбранного предела измерений напряжения и частоты.

При измеренном значении $U = 4,538$ В переменного напряжения частотой 50 Гц получим:

$$\Delta U = \pm (0,005 \cdot 4,538 + 15 \cdot 0,0001) = 0,024 \text{ В.}$$

2. Описание экспериментального стенда

Лабораторные работы выполняются в двух лабораториях. Каждый стенд содержит комплект модулей лабораторных работ и необходимые измерительные приборы (рис. 1).

При выполнении лабораторных работ используются следующие приборы:

- источники питания;
- генераторы сигналов специальной формы;

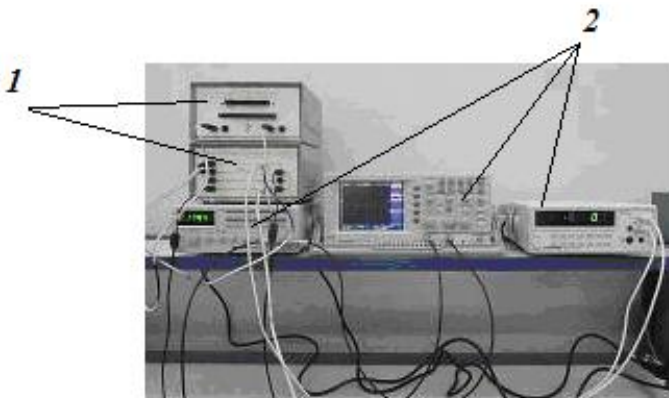


Рис. 1. Фотография компоновки стенда:

1 — модули лабораторной работы; 2 — комплект измерительных приборов

- универсальные цифровые вольтметры;
- мультиметры;
- электронные аналоговые осциллографы;
- электронные цифровые осциллографы.

2.1. Источники питания

Источник питания (ИП) обеспечивает получение стабилизированного напряжения постоянного тока в диапазонах, необходимых для выполнения лабораторных работ. В лаборатории используются несколько типов ИП. На рис. 2 изображен источник питания типа НУ 3003-2.



Рис. 2. Внешний вид источника питания серии НУ 3003-2

Источники питания серии НУ 3003-2, НУ 3005-2 предназначены для стабилизации постоянного напряжения или тока в зависимости от установленного режима и являются настольными многоканальными регулируемыми стабилизированными источниками питания постоянного тока. Уровень стабилизованного постоянного выходного напряжения и величина ограничения выходного тока имеют возможность плавной регулировки вращением регуляторов на передней панели. Все приборы этой серии имеют два независимых выхода регулируемого постоянного напряжения или постоянного тока. В данной серии выпускаются приборы, имеющие кроме двух основных выходов регулируемого постоянного напряжения или постоянного тока третий независимый выход фиксированного постоянного напряжения 5 В, 3 А. Предусмотрена работа источника как с изолированным выходом, так и с заземленной клеммой любой полярности. Выходы прибора имеют защиту от короткого замыкания. Приборы данной серии выпускаются с четырьмя типами индикаторов выходного напряжения и тока — светодиодными, жидкокристаллическими, двоянными или счетверенными стрелочными.

Источник питания НУ 3003-2 имеет два независимых регулируемых канала и следующие возможности: параллельное и последовательное соединения каналов; плавная установка выходных параметров регуляторами ГРУБО / ТОЧНО; режимы стабилизации тока и напряжения; защита от короткого замыкания. Питание — 110 / 220 В ± 10 %. Основные технические характеристики источника питания типа НУ 3003-2 представлены в табл. 1.

На рис. 3 изображен источник питания типа НУ-1502D.

Источник питания НУ-1502D имеет один регулируемый канал и возможность плавной установки выходных параметров регуляторами ГРУБО / ТОЧНО с режимами стабилизации тока и напряжения и защиту от короткого замыкания.

Таблица 1

**Основные технические характеристики источника питания
типа НУ 3003-2**

| Выходное напряжение каналов, В | Точность установки напряжения, В | Выходной ток каналов, А | Точность установки выходного тока, А | Уровень пульсаций напряжения, мВ |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 0–30 | 0,1 | 0–3 | 0,01 | ≤ 0,5 |



Рис. 3. Внешний вид источника питания HY-1502D

Основные технические характеристики источника питания типа HY-1502D представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Основные технические характеристики источника питания
типа HY-1502D**

| Выходное напряжение каналов, В | Точность установки напряжения, В | Выходной ток каналов, А | Точность установки выходного тока, А | Уровень пульсаций напряжения, мВ |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 0–15 | 0,1 | 0–2 | 0,01 | ≤ 0,5 |

На передней панели источника питания расположены основные органы управления, коммутации и индикации параметров электрических цепей выходных каналов источника. Тумблером СЕТЬ производится подключение источника к питающей цепи 220 В, при этом загорается светодиод СЕТЬ. Индикация значений напряжения и силы тока осуществляется с помощью цифровых табло на лицевой панели ис-

точника. Плавное регулирование выходного напряжения осуществляется с помощью ручек потенциометров.

2.2. Генератор сигналов специальной формы

В лаборатории использованы генераторы сигналов типа GFG-8219A. Внешний вид генератора представлен на рис. 4.

Выходной сигнал может иметь следующие формы:

- синусоидальную;
- треугольную;
- пилообразную;
- прямоугольную.

Диапазон частот разбит на семь декад — от 0,3 Гц до 3 МГц. Для выбора нужного частотного поддиапазона необходимо нажать одну из семи соответствующих этому поддиапазону кнопок.

Плавная регулировки частоты в пределах выбранного поддиапазона осуществляется поворотом ручки с надписью «FREQUENCY» в соответствии с указаниями на стенде.

Плавная регулировка выходного напряжения генератора производится поворотом ручки регулятора с надписью «AMPL».

Погрешность установки частоты по встроенному частотомеру зависит от выбранного поддиапазона и приведена в табл. 3.



Рис. 4. Генератор сигналов специальной формы GFG-8219A

**Абсолютная погрешность установки частоты на выходе генератора
GFG-8219A**

| Номер поддиапазона | Интервал частот, Гц | Погрешность, Гц |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 1 | 0,3—3 | $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ |
| 2 | 0,3—30 | $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ |
| 3 | 3— $3 \cdot 10^2$ | $\pm 1 \cdot 10^{-2}$ |
| 4 | 30— $3 \cdot 10^3$ | $\pm 1 \cdot 10^{-1}$ |
| 5 | $3 \cdot 10^2$ — $3 \cdot 10^4$ | ± 1 |
| 6 | $3 \cdot 10^3$ — $3 \cdot 10^5$ | ± 10 |
| 7 | $3 \cdot 10^4$ — $3 \cdot 10^6$ | $\pm 1 \cdot 10^2$ |

2.3. Вольтметр универсальный цифровой

Вольтметр универсальный цифровой предназначен для измерения основных электрических величин — напряжения постоянного и переменного тока, силы тока и сопротивления. В лаборатории используется вольтметр типа GDM-8245, внешний вид которого представлен на рис. 5. Основные характеристики режимов измерения вольтметра GDM-8245 приведены в табл. 4.

Расчет погрешностей величин, измеренных цифровым вольтметром, проводится по формулам, приведенным в табл. 4 и в паспорте прибора.



Рис. 5. Вольтметр GDM-8245

Таблица 4

**Основные характеристики режимов измерения универсального
цифрового вольтметра типа GDM-8245**

| Режим измерения постоянного напряжения | | |
|--|---|---------------------------------------|
| Предел измерения, В | Разрешение, k | Абсолютная погрешность |
| 0,5 | 10 мкВ | $\pm (0,0003U_x + 4k)$ |
| 5 | 100 мкВ | |
| 50 | 1 мВ | |
| 500 | 10 мВ | |
| Режим измерения переменного напряжения | | |
| Предел измерения: 500 мВ, 5 В, 50 В. Полоса частот | Разрешение, k | Абсолютная погрешность |
| 20—45 Гц | 10 мкВ (для 500 мВ) 100 мкВ (для 5 В) 1 мВ (для 50 В) | $\pm (0,01U_x + 15k)$ |
| 45—1000 Гц | | $\pm (0,005U_x + 15k)$ |
| 1—2 кГц | | $\pm (0,005U_x + 15k)$ |
| 2—10 кГц | | $\pm (0,01U_x + 15k)$ |
| 10—20 кГц | | $\pm (0,02U_x + 30k)$ |
| 20—50 кГц | | $\pm (0,05U_x + 30k)$ |
| Предел измерения: 500 В, 1000 В. Полоса частот | Разрешение, k | Абсолютная погрешность |
| 20—45 Гц | 10 мВ (для 500 В) 100 мВ (для 1000 В) | $\pm (0,01U_x + 15k)$ |
| 45—1000 Гц | | $\pm (0,005U_x + 15k)$ |
| 1—50 кГц | | 10 В (для 500 В) 20 В (для 1000 В) |
| Режим измерения постоянного тока | | |
| Предел измерения | Разрешение, k | Абсолютная погрешность |
| 500 мкА | 0,01 мкА | $\pm (0,002I_x + 2k)$ |
| 5 мА | 0,1 мкА | |
| 50 мА | 1 мкА | |
| 500 мА | 10 мкА | |
| 2 А | 100 мкА | |
| 20 А | 1 мА | $\pm (0,003I_x + 2k)$ |

| Режим измерения переменного тока | | |
|--|---|---------------------------|
| Предел измерения: 500 мкА, 5 мА, 50 мА, 500 мА, 2 А, 20 А Полоса частот | Разрешение, k | Абсолютная погрешность |
| 20–45 Гц | 0,01 мкА (для 500 мкА) 0,1 мкА (для 5 мА) 1 мкА (для 50 мА) | $\pm (0,01I_x + 15k)$ |
| 45–2000 Гц | 10 мкА (для 500 мА) 100 мкА (для 2 А) | $\pm (0,005I_x + 15k)$ |
| 2–10 кГц | 1 мА (для 20 А) | $\pm (0,01I_x + 15k)$ |
| 10–20 кГц | | $\pm (0,02I_x + 15k)$ |

Пример. Необходимо измерить постоянное напряжение в интервале значений 5—50 В. Измеренное значение напряжения оказалось равным $U = 45,036$ В. Абсолютная погрешность ΔU рассчитывается по формуле (табл. 4):

$$\Delta U = \pm (0,0003U + 4k) = \pm (0,0003 \cdot 45,036 + 4 \cdot 0,001) = \\ = \pm (0,0135 + 0,004) = 0,0175 \approx 0,018 \text{ В.}$$

2.4. Мультиметры

Помимо высокоточных стационарных цифровых вольтметров в лаборатории для измерения силы тока и напряжения используются портативные мультиметры. Основные технические характеристики мультиметров представлены в справочных материалах лаборатории и на сайте кафедры ОФиЯС <http://phns.mpei.ru/>.

2.5. Электронный осциллограф (ЭО)

При выполнении лабораторных работ используются два типа осциллографов — аналоговые и цифровые. Внешний вид используемых в лаборатории аналоговых осциллографов типа GOS-620 представлен на рис. 6.

Аналоговый электронный осциллограф предназначен для наблюдения на экране электронно-лучевой трубки электрических сигналов и измерения их параметров: длительность, период, амплитуда.

Основные функциональные блоки осциллографа — электронно-лучевая трубка, усилитель входного сигнала (в двухлучевых осциллографах имеется два усилителя), блок разверток, блок синхронизации и блок органов управления электронным лучом (регулировка яркости, фокусировки, смещения по горизонтали и вертикали).



Рис. 6. Осциллограф аналоговый GOS-620

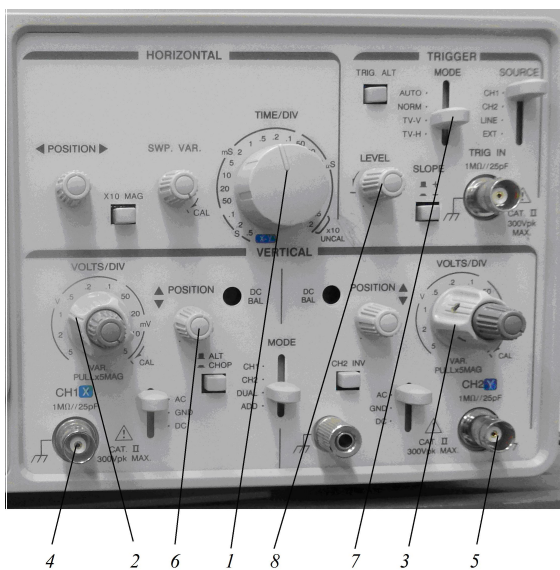


Рис. 7. Панель управления осциллографом аналоговым GOS-620:

1 — переключатель TIME / DIV (ВРЕМЯ/ДЕЛ) коэффициента развертки;
 2, 3 — переключатели VOLTS / DIV (ВОЛЬТ/ДЕЛ) коэффициента отклонения первого (4) и второго (5) канала соответственно; 6 — ручка управления положением луча на экране; 7 — переключатель режима развертки осциллографа; 8 — ручка LEVEL (УРОВЕНЬ) на блоке синхронизации

Сформированный в электронной трубке пучок электронов попадает на экран, в результате чего наблюдается свечение люминофора. Величина отклонения пучка зависит от приложенного к отклоняющим пластинам электронной трубки напряжения пилообразной формы («пилы»). При подаче пилообразного напряжения к пластинам X создаётся развёртка — движение луча слева направо по горизонтали. Затем луч возвращается назад и движется вправо. Это движение луча повторяется многократно. Исследуемое напряжение подается на пластины Y , вызывая отклонение луча по вертикали. В дальнейшем на экране аналогового осциллографа, как правило, наблюдается совпадение периодов сигнала и «пилы». В этом случае (в режиме синхронизации) в течение однократного прохода развёртки наблюдаются один либо несколько периодов исследуемого сигнала. При необходимости можно изменять масштабные коэффициенты по горизонтали и вертикали с помощью переключателей на лицевой панели осциллографа (рис. 7).

Основные технические характеристики используемых в лаборатории аналоговых осциллографов представлены в табл. 5 и табл. 6.

Таблица 5

Основные технические характеристики аналогового осциллографа типа GOS-620

| Количество каналов | Полоса пропускания, МГц | Коэффициент отклонения по вертикали ($K_{откл}$) | Погрешность установки $K_{откл}$ | Коэффициент развертки по горизонтали ($K_{разв}$) | Погрешность установки $K_{разв}$ |
|--------------------|-------------------------|--|----------------------------------|---|----------------------------------|
| 2 | 0–20 | 5 мВ/дел — 5 В/дел | ± 3 % | 0,2 мкс/дел — 0,5 с/дел | ± 3 % |

Таблица 6

Основные технические характеристики аналогового осциллографа типа ОСУ-10В

| Количество каналов | Полоса пропускания, МГц | Коэффициент отклонения по вертикали ($K_{откл}$) | Погрешность установки $K_{откл}$ | Коэффициент развертки ($K_{разв}$) | Погрешность установки $K_{разв}$ |
|--------------------|-------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 0–10 | 10 мВ/дел — 5 В/дел | ± 3 % | 0,1 мкс/дел — 0,1с/дел | ± 3 % |

2.6. Цифровой осциллограф

Цифровой осциллограф объединяет в себе возможности осциллографа аналогового вида и ЭВМ. Он не только может отображать показания изменяющегося напряжения в реальном времени, но и позволяет выполнить запись сигналов в свою память. В отличие от аналогового, цифровой осциллограф может показать «предварительный запуск», то есть просмотр предыстории сигнала до появления запуска исследуемого импульса. В цифровых осциллографах аналоговый исследуемый сигнал сразу же во входном блоке преобразуется в цифровую форму и запоминается в дискретной памяти. Зафиксированный в памяти сигнал может быть использован для отображения его на плоском матричном экране или любым другим способом.

Наряду с повышением точности регистрации сигнала, цифровые осциллографы позволяют полностью автоматизировать процесс измерения, осуществлять дистанционное управление режимом работы, производить математическую и логическую обработку информации. Использование матричных экранов снижает габариты и массу цифровых осциллографов и устраняет необходимость применения источников питания высокого напряжения.

В используемом в лаборатории цифровом осциллографе типа GDS-71022 (рис. 8) отображающее устройство представляет собой цветной жидкокристаллический экран размером 5,6 дюймов, 8×10 дел (разрешение 320×240).



Рис. 8. Внешний вид осциллографа цифрового типа GDS-71022

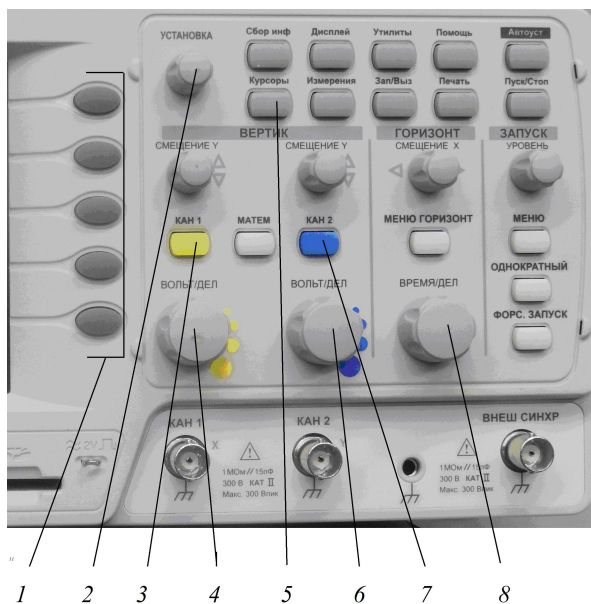


Рис. 9. Панель управления осциллографом цифровым типа GDS-71022:

1 — функциональные кнопки; 2 — рукоятка «УСТАНОВКА» перемещения курсоров по экрану осциллографа; 3, 7 — кнопки включения входных каналов; 4, 6 — переключатели ВОЛЬТ/ДЕЛ коэффициента отклонения по вертикали; 5 — кнопка КУРСОРЫ; 8 — переключатель ВРЕМЯ/ДЕЛ коэффициента развертки

В блок управления осциллографом включаются арифметическо-логические устройства, что намного расширяет функциональные возможности цифрового осциллографа. Становится возможным оцифровывать любые значения исследуемого сигнала, получать и отображать его производную, интеграл, спектральную характеристику, корреляционную функцию, распределение плотности вероятности и т.д.

На экране осциллографа, помимо собственно осциллограмм, отображается состояние органов управления (чувствительность, длительность развертки и т.п.). Предусмотрен вывод информации с осциллографа на печать и другие функциональные возможности.

Основные технические характеристики цифрового осциллографа типа GDS-71022 представлены в табл. 7.

**Основные технические характеристики цифрового осциллографа
типа GDS-71022**

| Полоса пропускания, МГц | Коэффициент отклонения повертикали ($K_{откл}$) | Погрешность установки $K_{откл}$ | Коэффициент развертки ($K_{разв}$) | Погрешность установки $K_{разв}$ | Количество каналов |
|-------------------------|---|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 0–25 | 2 мВ/дел — 5 В/дел | $\pm 3 \%$ | 1 нс/дел — 10 с/дел | $\pm 0,01 \%$ | 2 |

Дополнительные характеристики цифрового осциллографа типа GDS-71022: объем памяти 4 Кбайт на канал; автоматические и курсорные измерения; память — 15 осциллограмм, 15 профилей.

3. Порядок выполнения работы с вольтметром, аналоговым и цифровым осциллографами

3.1. Измерение напряжения с помощью электронного вольтметра

Пользуясь данными, приведенными в табл. 1—7, и указаниями на установке, заполните табл. 8.

Таблица 8

Спецификация измерительных приборов

| Название прибора и его тип | Количество каналов | Формула расчета погрешности измерений |
|----------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| | | |

Включите цифровой вольтметр GDM-8245 нажатием кнопки с надписью «POWER» в левом нижнем углу лицевой панели. Индикатор, находящийся вблизи кнопки, укажет свечением о включении прибора.

Нажатием кнопки «ACV» на лицевой панели вольтметра выберите режим измерения переменного напряжения.

В лаборатории с универсальными лабораторными стендами включите электропитание лабораторного стенда и подключите вольтметр к контрольным гнездам $\sim 6,3$ В блока коммутации (БК).

Измерьте переменное напряжение на контрольных гнездах БК. Рассчитайте погрешность измерения. Окончательный результат запишите в стандартном виде в табл. 9.

Подключите универсальный цифровой вольтметр GDM-8245 с помощью кабеля к выходу источника постоянного напряжения.

Вращая ручку плавной регулировки напряжения, установите напряжение в диапазоне 3—5 В по показанию дисплея источника. Запишите установленное напряжение в табл. 9.

Нажатием кнопки «DCV» на лицевой панели вольтметра выберете режим измерения постоянного напряжения. Результат измерений запишите в табл. 9.

Примечание. Для измерения переменного напряжения включается кнопка с надписью «ACV».

Пользуясь данными, приведенными в табл. 1 и табл. 2, рассчитайте погрешность установки напряжения на источнике и погрешность измерения напряжения с помощью вольтметра (табл. 4). Окончательный результат запишите в стандартном виде в табл. 9.

Таблица 9

Результаты измерений

| Название прибора и его тип | Номер канала | Установленное напряжение | Измеренное напряжение | Погрешности измерений |
|----------------------------|--------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | |

3.2. Наблюдение периодических сигналов на экране аналогового осциллографа

1. Соедините кабель питания осциллографа с источником напряжения и включите осциллограф. После включения осциллографа должен загореться световой индикатор, а через некоторое время на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) должна появиться линия развертки. Ручками INTEN (ЯРКОСТЬ) и FOCUS (ФОКУСИРОВКА) добейтесь оптимальной яркости и фокусировки луча на экране ЭЛТ.

Примечание. Подробное описание размещения ручек управления осциллографом и их назначение представлено в указаниях на стенде.

2. Переключатели 2, 3 VOLTS / DIV (рис. 7) установите на максимальный предел.

3. С помощью коаксиального кабеля подключите один из двух входных каналов 4, 5 (рис. 7) осциллографа типа GOS-620 либо входной канал осциллографа типа ОСУ-10В с надписью Y к выходу генератора сигналов специальной формы GFG-8219А. Нажатием кнопки в нижнем левом углу лицевой панели включите генератор GFG-8219А.

4. Нажмите кнопку с изображением синусоидального сигнала (~) в нижнем ряду кнопок на панели генератора.

5. Нажатием кнопки с надписью 1К в верхнем ряду кнопок на лицевой панели генератора GFG-8219А включите множитель частоты 1000 и вращением рукоятки установите частоту синусоидального сигнала, указанного преподавателем.

6. Используя потенциометр регулировки выходного напряжения генератора, установите значение напряжения, указанное преподавателем.

7. Переключатель 7 (рис. 7) режима развертки осциллографа установите в положение AUTO (АВТ).

8. Когда на экране осциллографа появится изображение синусоидального сигнала, выполните следующие операции:

— ручками управления положением луча (POSITION) ↑ и ↔ расположите изображение сигнала в центре экрана;

— переключателем 2 или 3 VOLTS / DIV (ВОЛЬТ/ДЕЛ) подберите уровень усиления, обеспечивающий получение удобного для наблюдения вертикального размера изображения на экране ЭЛТ (изображение сигнала должно занимать практически весь экран ЭЛТ);

— поворачивая ручку 8 LEVEL (УРОВЕНЬ) на блоке синхронизации, добейтесь того, чтобы изображение электрического сигнала на экране было неподвижным.

9. Переключателем 1 TIME / DIV (ВРЕМЯ/ДЕЛ) установите такое значение коэффициента развертки, при котором на экране наблюдается 2—3 периода синусоидального сигнала.

10. Изменяя частоту и амплитуду синусоидального сигнала, наблюдайте сигнал на экране осциллографа, добиваясь устойчивого изображения.

11. По делениям шкалы экрана осциллографа определите визуально линейные размеры сигнала (амплитуду, период) в делениях;

12. Определите значения амплитуды и периода синусоидального сигнала умножением соответствующих значений коэффициентов вертикального отклонения и горизонтальной развертки на линейные размеры измеренных параметров сигнала.

13. Нажмите кнопку включения прямоугольных импульсов на панели генератора импульсов. Получите на экране осциллографа изображение прямоугольных импульсов.

3.3. Наблюдение периодических сигналов на экране цифрового осциллографа

1. С помощью коаксиального кабеля подключите один из двух входных каналов цифрового осциллографа к выходу генератора сигналов специальной формы GFG-8219A.

2. Нажатием кнопок в нижнем левом углу лицевых панелей включите генератор и цифровой осциллограф.

3. Нажмите кнопку с изображением синусоидального сигнала (~) в нижнем ряду кнопок на панели генератора.

4. Нажатием кнопки с надписью 1K в верхнем ряду кнопок на лицевой панели генератора GFG-8219A включите множитель частоты 1000 и вращением рукоятки с надписью FREQUENCY установите частоту колебаний, указанную преподавателем. Вращением рукоятки с надписью AMPL установите указанную преподавателем амплитуду колебаний.

5. На панели цифрового осциллографа (рис. 9) нажмите кнопку 3 (либо 7) управления каналами в соответствии с номером канала, к которому подключен кабель генератора (подробное описание расположения кнопок на панели осциллографа представлено в указаниях на стенде).

6. Вращением рукоятки переключателя ВОЛЬТ/ДЕЛ 4 (6) (рис. 9) добейтесь, чтобы изображение синусоидального сигнала заняло, практически, всю площадь экрана дисплея.

7. Вращением рукоятки переключателя 4 (8) ВРЕМЯ/ДЕЛ установите такое значение коэффициента развертки, при котором на экране наблюдается 2—3 периода синусоидального сигнала.

8. Цифровой осциллограф обеспечивает возможность различных измерений с помощью курсоров — светящихся вертикальных и горизонтальных линий, которые появляются на экране при нажатии кнопки 5 «Курсоры» на панели осциллографа (рис. 8). С помощью вертикальных курсоров возможно измерение временных параметров. С помощью горизонтальных курсоров возможно измерение амплитудных параметров сигнала.

9. Справа от экрана на одной вертикали расположены пять функциональных кнопок 1 управления меню экрана. После нажатия кноп-

ки 5 «Курсоры», нажимая верхнюю функциональную кнопку F1, выберите номер канала 1 или 2. Нажимая и отпуская нижнюю функциональную кнопку F5, выберите горизонтальные (X) или вертикальные (Y) курсоры.

10. В поле управления курсорами установите активный для управления курсор (нажатием соответствующей функциональной кнопки 1) и вращением регулятора 2 «УСТАНОВКА» установите активный курсор в необходимую позицию. В поле отображения результата измерения будет присутствовать значение напряжения, соответствующее положению горизонтального курсора, или значение времени для вертикальных курсоров.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 20

ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Цель работы — освоение методов измерения параметров электрических сигналов с помощью электронного осциллографа, оценка погрешностей измерения электрических величин.

1. Теоретические основы работы

Зависимость мгновенного значения напряжения от времени $U(t)$ может использоваться для передачи информации и поэтому называется электрическим сигналом. В настоящее время с помощью цифровых методов можно получить электрический сигнал любой формы. В данной работе изучаются две формы электрических сигналов: синусоидальная (рис. 1) и прямоугольная (рис. 2).

Сигналы синусоидальной и прямоугольной формы являются периодическими функциями времени. Функция $f(x)$ называется периодической, если существует такое число $T > 0$ (период), что на всей области определения функции выполняется равенство $f(x) = f(x + T)$. Применительно к электрическому сигналу, периодом T называется наименьший интервал времени, через который повторяется мгновенное значение напряжения $U(t)$ для любого момента времени t (рис. 1 и рис. 2).

Сигнал синусоидальной формы (переменное напряжение) описывается уравнением гармонических колебаний

$$U = U_m \cos(\omega t + \varphi),$$

где U_m — амплитудное значение напряжения (амплитуда); t — время; ω — циклическая частота; $(\omega t + \varphi)$ — фаза колебаний; φ — начальная фаза.

Частота колебаний ν — величина, обратная периоду колебаний:

$$\nu = T^{-1}.$$

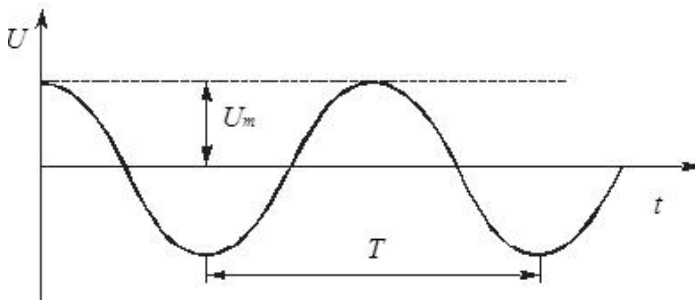


Рис. 1. Сигнал синусоидальной формы:

T — период, U_m — амплитуда сигнала

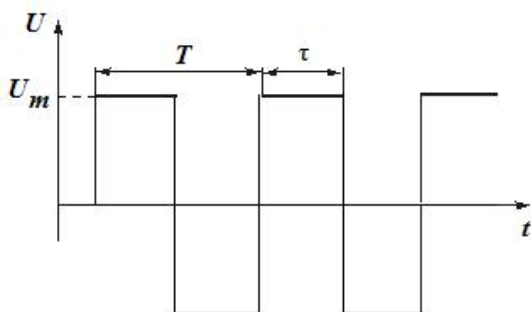


Рис. 2. Сигнал прямоугольной формы:

T — период, τ — длительность, U_m — амплитуда сигнала

Циклическая частота ω — величина, равная произведению частоты колебаний на 2π :

$$\omega = 2\pi\nu.$$

Измерение переменного напряжения электроизмерительными приборами дает действующее значение U_d , которое связано с амплитудным значением синусоидального сигнала:

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Амплитудное значение напряжения может быть измерено с помощью электронного осциллографа.

Форма реального прямоугольного сигнала отличается от идеального прямоугольника. Обычно в электронной схеме время нарастания сигнала t_n составляет от нескольких наносекунд до нескольких микросекунд. Сигнал прямоугольной формы (рис. 2.) характеризуется амплитудой U_m , периодом T , длительностью τ , а также скважностью — отношением периода следования к длительности импульсов.

2. Описание экспериментальной установки

Подробное описание установки, приборное оснащение, правила эксплуатации и порядок измерений электрических величин приведены в вводной работе. При выполнении лабораторной работы используются следующие приборы: электронный осциллограф, генератор сигналов специальной формы, цифровой вольтметр.

3. Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (табл. 1).

2. Измерьте амплитуду U_m и период T синусоидальных колебаний:

— проверьте соединение, а в случае его отсутствия соедините коаксиальным кабелем выход генератора сигналов специальной формы с одним из двух входных каналов на лицевой панели осциллографа;

— нажмите кнопку  (СИНУСОИДАЛЬНЫЙ СИГНАЛ) на панели генератора сигналов специальной формы;

— включите тумблеры СЕТЬ лабораторного стенда, осциллографа, генератора и вольтметра;

— установите на генераторе значения частоты и выходного напряжения синусоидального сигнала, указанные преподавателем;

— когда на экране осциллографа появится изображение синусоидального сигнала, выполните следующие операции:

- с помощью регулировки яркости и фокусировки получите тонкую и достаточно яркую линию;
- ручками перемещения луча по горизонтали и вертикали выведите изображение сигнала в центр экрана;

Таблица 1

Спецификация измерительных приборов

| Название прибора и его тип | Пределы измерения | Инструментальная погрешность |
|----------------------------|-------------------|------------------------------|
| | | |

- ручкой регулировки уровня синхронизации (LEVEL) добейтесь устойчивого изображения (синхронизация — внутренняя);

- регулировкой усиления по вертикали добейтесь, чтобы изображение занимало практически весь экран;

- подберите значение коэффициента развертки по горизонтали, при котором на экране наблюдается 2—3 периода синусоидальных колебаний;

— измерьте по шкале (в делениях шкалы) на экране осциллографа амплитуду H синусоидального сигнала. Результат измерения и коэффициент отклонения по вертикали Y_m в единицах «В/дел» запишите в табл. 2;

— измерьте по шкале на экране осциллографа число делений L , соответствующих целому числу n периодов. Результаты измерений и значение коэффициента развертки по горизонтали X_m в единицах время/дел запишите в табл. 2.

3. Измерьте параметры импульсного сигнала:

— нажмите кнопку  (ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ИМПУЛЬСЫ) на панели генератора сигналов;

— получите устойчивое изображение прямоугольного сигнала на экране осциллографа;

— измерьте по шкале на экране осциллографа амплитуду сигнала H , его длительность L_1 и период следования L_2 . Результаты измерений, значение коэффициента отклонения по вертикали Y_m в единицах В/дел и коэффициента развертки по горизонтали X_m в единицах время/дел запишите в табл. 3.

Таблица 2

Измерение амплитуды и периода синусоидального сигнала

| Установлено | Измерено осциллографом | | | |
|-------------|------------------------|----------------|-----------|------------|
| | H , дел | Y_m , В/дел | U_m , В | U_d , В |
| U_d , В | | | | |
| ν , Гц | L , дел | X_m , мс/дел | T , мс | ν , Гц |
| | | | | |

Измерение амплитуды, длительности и периода импульсного сигнала

| | | |
|-------------|--------------|-------------|
| H , дел | Y , В/дел | U , В |
| L_1 , дел | X , мс/дел | τ , мс |
| L_2 , дел | X , мс/дел | T , мс |

4. Обработка результатов измерений

1. Используя данные, приведенные в табл. 2, рассчитайте амплитуду синусоидального сигнала по формуле

$$U_m = HY_m.$$

2. Вычислите значение действующего напряжения синусоидального сигнала по формуле

$$U_D = U_m / \sqrt{2}.$$

3. Рассчитайте период колебаний по формуле

$$T = LX_m.$$

4. Рассчитайте частоту колебаний по формуле

$$\nu = 1 / T.$$

5. По данным, приведенным в табл. 3, рассчитайте амплитуду, длительность, период и частоту следования сигнала прямоугольной формы.

6. Рассчитайте погрешности измерений, запишите результат в стандартном виде.

5. Контрольные вопросы

1. Что называется амплитудой гармонических колебаний?
2. Что характеризует фаза колебаний?
3. Как с помощью осциллографа измеряется амплитуда и длительность электрического сигнала?
4. Какие параметры синусоидального сигнала можно измерить с помощью вольтметра?
5. В каком соотношении находится действующее и амплитудное значение синусоидального сигнала?

Лабораторная работа № 21

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Цель работы — изучение электростатических полей, создаваемых заряженными проводниками (электродами) различной конфигурации, и описание полей при помощи линий напряженности (силовых линий) и линий равного потенциала (эквипотенциальных линий).

1. Теоретические основы работы

Графически электростатическое поле, создаваемое заряженными проводниками, может быть представлено двумя способами, дополняющими друг друга, — с помощью эквипотенциальных поверхностей и силовых линий. Поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется эквипотенциальной поверхностью. Линия пересечения ее с плоскостью чертежа называется эквипотенциальной линией (эквипотенциалью). Линии напряженности (силовые линии) — это линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности электростатического поля \vec{E} . На рис. 1 штриховыми линиями представлены эквипотенциальные линии, сплошными — силовые линии электростатического поля.

Прямое исследование электростатического поля заменим точной и более удобной моделью. При некоторых условиях распределение потенциала в среде, в которой течёт ток в пространстве между установленными электродами, может быть тождественным с распределением потенциала между теми же электродами, когда между ними имеется электростатическое поле в вакууме. Таким образом, можно заменить изучение электростатического поля между системой заряженных проводников изучением электриче-

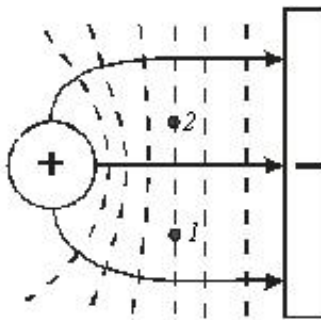


Рис. 1. Силовые и эквипотенциальные линии электростатического поля

ского поля постоянного тока той же системы проводников, потенциалы которых поддерживаются постоянными.

Между напряженностью и потенциалом электростатического поля существует интегральная и дифференциальная связь:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}, \quad (1)$$

$$\vec{E} = - \text{grad } \varphi. \quad (2)$$

Разность потенциалов между точками 1 и 2 (рис. 1) равна нулю, так как они находятся на одной эквипотенциальной линии. В этом случае из (1) следует:

$$\int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = 0 \quad \text{или} \quad \int_1^2 E dl \cos(\vec{E}, \hat{d\vec{l}}) = 0.$$

Так как E и dl не равны нулю, тогда $\cos(\vec{E}, \hat{d\vec{l}}) = 0$, и, следовательно, но, угол между эквипотенциальной и силовой линией составляет 90° .

Из дифференциальной связи (2) следует, что силовые линии направлены в сторону убывания потенциала. Значение напряженности электрического поля отображается густотой силовых линий — чем меньше расстояние между эквипотенциальными линиями, тем больше напряженность поля и, следовательно, гуще силовые линии. Исходя из этих принципов и располагая системой эквипотенциальных линий, можно построить картину силовых линий.

Ортогональность линий напряженности электростатического поля и эквипотенциальных поверхностей существенно облегчает экспериментальное исследование электростатического поля. Так как измерить потенциал оказывается проще, чем напряжённость электростатического поля, то сначала находится распределение потенциалов, а линии напряжённости изучаемых полей строятся уже потом, как ортогональные к эквипотенциальным линиям.

Достаточно подробная картина эквипотенциальных линий поля позволяет рассчитать в разных точках значение проекции вектора напряженности \vec{E} на выбранное направление оси x , усредненное по некоторому интервалу Δx :

$$E_x = - \frac{\Delta \varphi}{\Delta x}, \quad (3)$$

где Δx — приращение координаты при переходе от одной эквипотенциальной линии к другой; $\Delta\varphi$ — соответствующее приращение потенциала; E_x — среднее значение проекции напряженности электростатического поля между двумя эквипотенциальными линиями.

2. Описание экспериментальной установки

Для моделирования электростатических полей удобно использовать аналогию, существующую между электростатическим полем, созданным заряженными телами в вакууме, и электрическим полем постоянного тока в однородной проводящей среде. При этом расположение линий электрических токов оказывается аналогичным расположению силовых линий электростатического поля. То же утверждение справедливо для распределения потенциала.

В качестве проводящей среды в работе используется электропроводящая бумага с одинаковой во всех направлениях проводимостью. Моделируются плоские поля, потенциал и напряжённость электрического поля которых зависят лишь от двух координат. На бумаге закрепляются массивные электроды так, чтобы обеспечить их надёжный электрический контакт с проводящей бумагой.

Для исследования электростатического поля применяется установка, электрическая схема которой приведена на рис. 2.

Напряжение U от источника питания I подается на электроды 3, закрепленные на электропроводящей бумаге 2. Потенциал точки поверхности электропроводящей бумаги, которой касается зонд 4, измеряется мультиметром (цифровым вольтметром) 5.

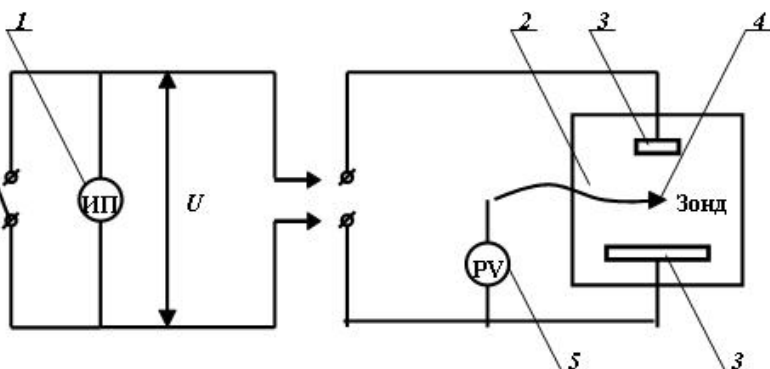


Рис. 2. Электрическая схема лабораторной установки

Совокупность точек на электропроводящей бумаге с одинаковым потенциалом и есть изображение эквипотенциальной линии.

3. Порядок выполнения работы

1. Разместите на предметном столике лист миллиметровой бумаги, на него положите копировальную бумагу, а поверх нее — лист электропроводящей бумаги.

2. Установите на электропроводящей бумаге систему электродов, заданную преподавателем. Обведите зондом контуры электродов.

3. Включите источник питания ИП и мультиметр (цифровой вольтметр) PV.

4. Установите на источнике питания ИП значение выходного напряжения U , указанное преподавателем.

5. Перемещая зонд по электропроводящей бумаге, и легко касаясь ее, через каждые 2—3 см найдите точки, потенциалы которых равны значению потенциала эквипотенциальной линии, указанной преподавателем. В данной точке нужно произвести нажатие зондом, чтобы оставить след на миллиметровой бумаге (нельзя допускать при этом прокола зондом электропроводящей бумаги). Таким образом, на миллиметровой бумаге будут оставлены следы заданной эквипотенциальной линии с заданным значением потенциала.

6. Повторите пункт 5 для определения других эквипотенциальных линий по согласованию с преподавателем (желательно для потенциалов $0,3U$; $0,4U$; $0,5U$; $0,6U$; $0,7U$; $0,8U$).

7. Установите нулевое значение выходного напряжения источника питания. Выключите источник питания и мультиметр (вольтметр).

8. Снимите миллиметровую бумагу с предметного столика и по точкам начертите эквипотенциальные линии, отметив соответствующие им значения потенциалов.

9. Повторите пункты 1—8 для другой системы электродов, заданной преподавателем.

4. Обработка результатов измерений

Для каждой системы электродов произведите обработку графического изображения электростатического поля — начертите семейство эквипотенциальных и силовых линий, учитывая, что эквипотенциальные и силовые линии ортогональны, а густота силовых линий тем больше, чем меньше расстояние между эквипотенциальными линиями.

Зависимость потенциала электростатического поля от координат

| № | φ_n , В | x_n , м | $x_{ср}$, м | $\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi_{n-1}$, В | Δx , м | E_{x_n} В/м |
|---|-----------------|-----------|--------------|---|----------------|---------------|
| | | | | | | |

На картине поля начертите координатную ось x вдоль оси симметрии поля (по указанию преподавателя) и разметьте ее. По формуле (3) рассчитайте значение проекции вектора напряженности электрического поля на эту ось в точках с координатами x , лежащими посередине между соседними эквипотенциальными линиями. Результаты расчетов запишите в табл. 1.

Используя данные табл. 1, постройте графики зависимости потенциала от координаты x и напряженности электростатического поля от $x_{ср}$.

5. Контрольные вопросы

1. Что называют напряженностью электростатического поля?
2. Что называют разностью потенциалов и потенциалом электростатического поля?
3. Какова дифференциальная связь между вектором напряженности электростатического поля и потенциалом?
4. Какова интегральная связь между разностью потенциалов и напряженностью электростатического поля?
5. На чем основывается возможность моделирования электростатических полей?
6. Каковы особенности взаимного расположения эквипотенциальных и силовых линий электростатического поля?
7. Как густота силовых линий поля характеризует значение напряженности?

Лабораторная работа № 22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Цель работы — определение относительной диэлектрической проницаемости жидкого диэлектрика на основе эффекта втягивания его в неоднородное электрическое поле.

1. Теоретические основы работы

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ характеризует способность диэлектриков поляризоваться во внешнем электрическом поле.

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле происходит поляризация диэлектрика (в любом его объеме ΔV возникает отличный от нуля суммарный дипольный электрический момент частиц). Количественной мерой поляризации является поляризованность — векторная величина численно равная дипольному моменту единицы объема диэлектрика

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_1^N \vec{p}_i,$$

где $\vec{p} = q\vec{l}$ — электрический дипольный момент частиц (атомов, ионов, молекул); q — заряд, l — плечо диполя; N — число частиц в объеме ΔV .

Процесс поляризации неполярного диэлектрика сопровождается смещением центров положительных и отрицательных зарядов молекулы друг относительно друга, т.е. образованием диполей, ориентированных, в основном, в направлении вектора напряженности электрического поля в данной точке пространства.

Молекулы полярных диэлектриков имеют дипольные моменты и в отсутствие электрического поля. Поэтому поляризация полярных диэлектриков сопровождается ориентацией электрических дипольных моментов преимущественно вдоль направления вектора напряженности внешнего электрического поля. Этому процессу препятствует тепловое движение молекул.

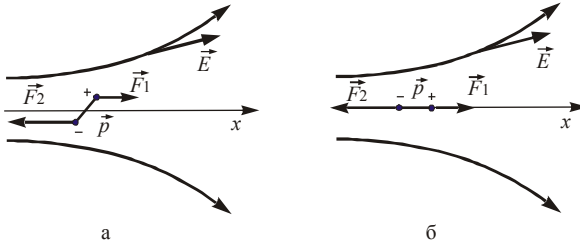


Рис. 1. Силы, действующие на электрический диполь в неоднородном электрическом поле

Рассмотрим диполь в неоднородном поле (рис. 1, *a*). На диполь действует пара сил, стремящаяся сориентировать его вдоль силовых линий. Так как отрицательный заряд диполя находится в области с большей напряженностью электрического поля, чем положительный заряд (рис. 1, *б*), то диполь будет втягиваться в область с большей напряженностью поля.

На отрицательный заряд диполя действует сила

$$F_2 = -qE,$$

где E — напряженность электрического поля в той точке, где находится заряд.

Так как плечо диполя l весьма мало, то электрическая сила, действующая на положительный заряд, может быть вычислена следующим образом:

$$F_1 = q \left(E + \frac{dE}{dx} l \right),$$

а результирующая сила записана в виде

$$F = -qE + q \left(E + \frac{dE}{dx} l \right) = ql \frac{dE}{dx} = p \frac{dE}{dx}. \quad (1)$$

Рассмотрим теперь плоский конденсатор, частично погруженный в жидкий диэлектрик (рис. 2). В отсутствии электрического поля, за счет действия капиллярных сил уровень жидкости между обкладками конденсатора будет на h_1 выше уровня жидкости в кювете (рис. 2, *a*).

При подаче высокого напряжения U на обкладки конденсатора за счет неоднородности электрического поля на краю обкладок конденсатора жидкость втягивается внутрь конденсатора до высоты h_2 (рис. 2, *б*).

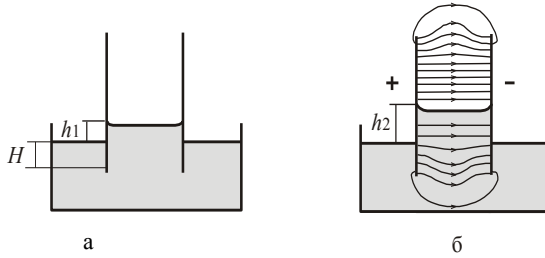


Рис. 2. Втягивание жидкого диэлектрика в плоский конденсатор

Изменение электрической энергии конденсатора определяется выражением

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \frac{C_2 U^2}{2} - \frac{C_1 U^2}{2} = \frac{U^2}{2} (C_2 - C_1), \quad (2)$$

где C_1 и C_2 — емкости конденсатора до и после подъема жидкости на высоту $\Delta h = h_2 - h_1$.

Конденсатор, частично заполненный жидкостью, можно рассматривать как два параллельно соединенных конденсатора: конденсатор с площадью обкладки $a(H + h)$, заполненный жидким диэлектриком, и воздушный конденсатор с площадью обкладки $(S - a(h + H))$. Емкость такого конденсатора определяется следующим образом

$$\begin{aligned} C &= C_{\text{диэл}} + C_{\text{возд}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a(H+h)}{d} + \frac{\varepsilon_0 (S - a(h+H))}{d} = \\ &= \frac{\varepsilon_0 S}{d} + \frac{\varepsilon_0 a(h+H)}{d} (\varepsilon - 1), \end{aligned} \quad (3)$$

где a — ширина пластины; S — площадь пластины; $a(h + H)$ — площадь погруженной части пластины; d — расстояние между пластинами; ε — относительная диэлектрическая проницаемость жидкости; ε_0 — электрическая постоянная.

Тогда изменение емкости конденсатора определяется выражением:

$$C_2 - C_1 = \frac{\varepsilon_0 a \Delta h}{d} (\varepsilon - 1), \quad (4)$$

где $\Delta h = h_2 - h_1$.

Согласно закону сохранения энергии для электрического поля, изменение энергии конденсатора равно сумме работы внешних сил A' и работы источника питания $A_{\text{ист}}$:

$$\Delta W = A' + A_{\text{ист}}. \quad (5)$$

В рассматриваемом случае работа внешних сил — это работа силы тяжести по подъему жидкости массой $m = \rho ad \Delta h$ на высоту Δh :

$$A' = -\frac{1}{2} mg \Delta h = -\frac{1}{2} \rho ad \Delta h^2 g. \quad (6)$$

Здесь знак минус учитывает, что работа силы тяжести отрицательна.

Работа, совершенная источником электрической энергии, определяется по формуле:

$$A_{\text{ист}} = \mathcal{E} \Delta q = U \Delta q = U^2 (C_2 - C_1), \quad (7)$$

где \mathcal{E} — ЭДС источника электрической энергии, равная в данном случае напряжению на обкладках конденсатора U ; Δq — изменение заряда конденсатора, обусловленное изменением его электроемкости при вытягивании диэлектрика.

С учетом (2), (6) и (7) выражение (5) принимает следующий вид:

$$\frac{U^2}{2} (C_2 - C_1) = -\frac{1}{2} \rho ad \Delta h^2 g + U^2 (C_2 - C_1).$$

Отсюда с учетом (4) получим выражение для расчета диэлектрической проницаемости жидкости:

$$\varepsilon = 1 + \frac{\rho d^2 \Delta h g}{\varepsilon_0 U^2}. \quad (8)$$

2. Описание лабораторной установки

Схематическое изображение экспериментальной установки лабораторной работы (вид сверху) приведено на рис. 3.

Осветителем 1 через светофильтр 2 освещается зазор между обкладками плоского конденсатора 3, частично погруженного в жидкий диэлектрик. Конденсатор находится в прозрачной кювете 4. На конденсатор подается высокое напряжение от источника питания постото-

янного тока, смонтированного внутри лабораторного модуля. С противоположной стороны зазор плоского конденсатора со столбом диэлектрика наблюдают через оптическую систему отсчетного микроскопа 5. Маховиком 6 осуществляется наводка на резкость изображения столба диэлектрика, а маховиком 8 наводится на резкость изображение измерительной шкалы, находящейся в окуляре 7.

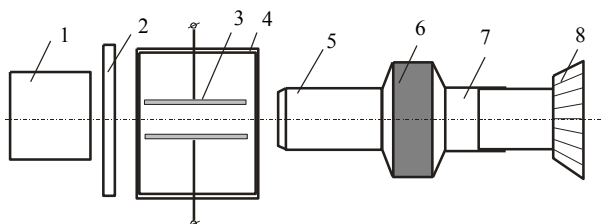


Рис. 3. Схема лабораторной установки (вид сверху)

3. Порядок выполнения работы

1. Заполните табл. 1.
2. Включите электрическое питание стенда.
3. Тумблером ОСВЕТИТЕЛЬ включите осветитель установки.
4. Перемещением вперед-назад и поворотом маховика отсчетного микроскопа получите отчетливое изображение мениска жидкости и обкладок конденсатора.
5. Поворотом маховика окуляра получите четкое изображение шкалы отсчетного микроскопа.
6. Поворотом окуляра отсчетного микроскопа установите шкалу горизонтально.
7. Измерьте расстояние d между обкладками конденсатора, используя 25-кратную шкалу микроскопа.
8. Установите шкалу отсчетного микроскопа вертикально (нуль шкалы обращен вверх).
9. Измерьте положение h_1 центра столба мениска жидкости в конденсаторе.
10. Тумблером СЕТЬ модуля лабораторной работы подайте высокое напряжение на обкладки конденсатора.

11. Измерьте положение h_2 центра мениска столба поднявшейся жидкости.

12. Отключите высокое напряжение.

13. Операции пунктов 5—12 повторите пять раз. Результаты измерений запишите в табл. 2.

14. Отключите осветитель и электрическое питание установки.

Таблица 1

Спецификация измерительных приборов

| Название прибора, его тип | Пределы измерения | Инструментальная погрешность |
|---------------------------|-------------------|------------------------------|
| | | |

Таблица 2

Измерение ширины воздушного зазора конденсатора и координат мениска столба жидкого диэлектрика

| № | d , мм | h_{1c} , мм | h_{2c} , мм |
|-----|----------|---------------|---------------|
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| ср. | | | |

4. Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте средние значения высоты h_{1c} и h_{2c} столба диэлектрика и расстояние d_{cp} между обкладками конденсатора.

2. Определите изменение высоты поднятия диэлектрика в электрическом поле $\Delta h = |h_{2c} - h_{1c}|$.

3. Рассчитайте по формуле (8) значение диэлектрической проницаемости жидкости.

4. Рассчитайте погрешность измерения диэлектрической проницаемости жидкости, используя формулы:

$$\Delta \epsilon = \bar{\epsilon} \delta_{\epsilon}, \quad \delta_{\epsilon} = \sqrt{4\delta_d^2 + \delta_{\Delta h}^2}, \quad \epsilon = \bar{\epsilon} \pm \Delta \epsilon.$$

5. Запишите окончательный результат в стандартном виде.

5. Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл диэлектрической проницаемости, как она связана с диэлектрической восприимчивостью молекул?
2. Что называется поляризованностью диэлектрика?
3. Опишите особенности поляризации диэлектриков с полярными и неполярными молекулами.
4. Какие силы действуют на электрический диполь в неоднородном электрическом поле?
5. Запишите закон сохранения энергии при погружении заряженного воздушного конденсатора в жидкий диэлектрик (конденсатор все время подключен к источнику питания).

Лабораторная работа № 23

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА МЕТОДОМ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЗАРЯДКИ И РАЗРЯДКИ

Цель работы — экспериментальное определение электроемкости конденсатора, изучение схем параллельного и последовательного соединения конденсаторов.

1. Теоретические основы работы

Электрический заряд распределяется по поверхности проводника единственно возможным образом, обеспечивающим нулевое значение напряженности поля и, следовательно, постоянство потенциала в каждой его точке. Поэтому при сообщении проводнику заряд «порциями», каждая следующая порция будет распределяться по поверхности так же, как предыдущая. Вследствие этого заряд проводника Q пропорционален его потенциалу φ , а коэффициент пропорциональности между зарядом и потенциалом называется электроемкостью проводника:

$$C = Q/\varphi. \quad (1)$$

Конденсатор представляет собой систему проводников (обкладок), несущих равные по модулю, но противоположные по знаку заряды. Важно отметить, что электрическое поле конденсатора локализовано в пространстве между его обкладками, а вне обкладок поля — нет. Вследствие этого наличие других проводников не влияет на разность потенциалов между обкладками конденсатора. Конденсаторы находят широкое применение во всех областях электротехники и характеризуются, прежде всего, своей электроемкостью — отношением накопленного заряда к разности потенциалов между обкладками:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2}. \quad (2)$$

Поскольку прямое измерение электрического заряда конденсатора невозможно, в лабораторной работе используется метод периодической зарядки и разрядки. Рассмотрим процесс разрядки конденсатора через резистор с сопротивлением R . По определению сила тока в цепи

$i = \frac{dq}{dt} = i_0 e^{-\frac{t}{RC}}$, где RC — постоянная времени. Тогда при полной разрядке конденсатора с зарядом Q справедливо соотношение:

$$Q = \int_0^Q dq = \int_0^{\tau} i dt. \quad (3)$$

В выражении (3) величина τ соответствует времени полной разрядки конденсатора. Как известно, конденсатор разрядится на 99 % за время $\tau \approx 5RC$, где R — сопротивление резистора, через который разряжается конденсатор. Для вычисления интеграла в правой части (3) применим теорему о среднем и, обозначив силу среднего тока разрядки как $I_{\text{ср}}$, получим выражение для Q :

$$Q = I_{\text{ср}} \tau. \quad (4)$$

Если заряжать и разряжать конденсатор с промышленной частотой переменного тока $f = 1/\tau = 50$ Гц, то за время между двумя последующими зарядками конденсатор будет успевать практически полностью разрядиться, поскольку в рассматриваемой схеме $\frac{1}{f} \gg RC$.

Если для измерения силы тока при разрядке конденсатора использовать микроамперметр, подвижная система которого обладает периодом собственных колебаний, существенно превышающим время разрядки конденсатора, то такая система не будет «успевать» реагировать на быстрые изменения силы тока и покажет некоторое среднее значение тока разрядки (см. рис. 1).

Подставив выражение (4) в (2), получим окончательное выражение для электроемкости конденсатора:

$$C = \frac{I_{\text{ср}} \tau}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{I_{\text{ср}}}{Uf}, \quad (5)$$

где $(U = \varphi_1 - \varphi_2)$ — напряжение на источнике питания, равное разности потенциалов между обкладками конденсатора.

Отметим, что описанный метод позволяет измерять электроемкость не только одиночных конденсаторов, но также и батарей конденсаторов.

Поскольку при последовательном соединении заряды всех конденсаторов равны между собой и равны заряду всей батареи конденсаторов:

$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n,$$

а напряжение батареи конденсаторов равно алгебраической сумме напряжений на отдельных конденсаторах:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i,$$

то емкость батареи $C_{\text{посл}}$ из последовательно соединенных конденсаторов (рис. 2, а) определяется выражением:

$$1/C_{\text{посл}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (6)$$

При параллельном соединении конденсаторов заряд батареи равен алгебраической сумме зарядов всех конденсаторов:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i,$$

а напряжения одинаковы $U_i = U$.

Поэтому для параллельно соединенных конденсаторов (рис. 2, б) емкость равна сумме емкостей всех конденсаторов:

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (7)$$

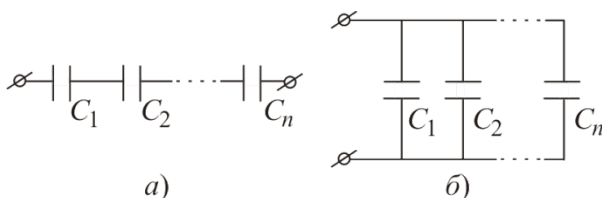


Рис. 2. Схемы последовательного (а) и параллельного (б) соединения конденсаторов

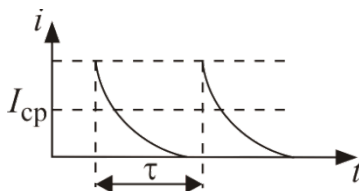


Рис. 1. Зависимость тока разрядки конденсатора от времени

2. Описание экспериментальной установки

Принципиальная электрическая схема установки показана на рис. 3. Конденсатор (или система конденсаторов) неизвестной электроемкости подключают к точкам 1 и 2. При этом в одном положении поляризационного реле (РП) конденсатор оказывается подсоединенным к источнику питания с ЭДС \mathcal{E} , при этом происходит его зарядка. При переключении реле конденсатор разряжается через микроамперметр, при этом производится измерение силы среднего тока разрядки. Переключение РП происходит с частотой промышленного тока $f = 50$ Гц; на электрической схеме показано подключение обмотки РП к источнику переменного напряжения промышленной частоты. Включение реле производится выключателем на панели лабораторного модуля, а его срабатывание происходит при *кратковременном* нажатии кнопки К.

Обратите внимание, что при правильном соединении точек 3, 4, 5 с точками 1 и 2 можно добиться поодиночного включения в схему конденсаторов с электроемкостями C_1 и C_2 , а также их параллельного и последовательного включения в цепь.

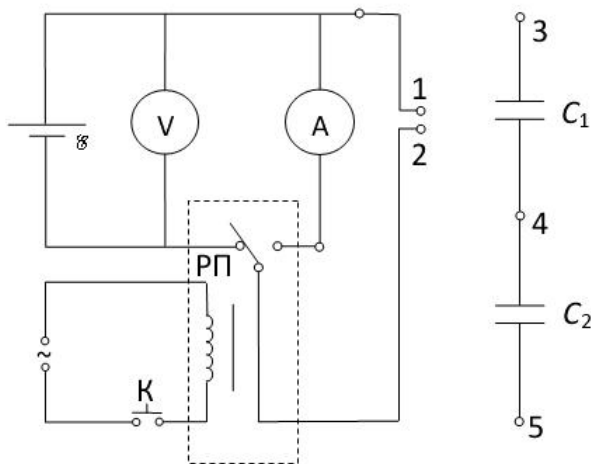


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема

3. Порядок выполнения работы

1. Заполните табл. 1.
2. Изучите мнемоническую схему на панели лабораторного модуля. Проверьте подключение источника питания и микроамперметра.
3. Подключите к измерительной цепи конденсатор C_1 .
4. Включите источник питания и установите напряжение U_1 , указанное на лабораторной установке.
5. Нажмите кнопку К, включив реле, и измерьте силу среднего тока разрядки конденсатора. Измерение тока разрядки (нажатие кнопки) должно длиться не более 2 секунд. Результат измерения запишите в табл. 2.
6. Уменьшите поданное на конденсатор напряжение U_1 до нулевого значения, подключите к измерительной цепи конденсатор C_2 и, установив напряжение U_1 повторите пункт 5.
7. Уменьшите поданное на конденсатор напряжение U_1 до нулевого значения, соедините два конденсатора параллельно и подключите их к измерительной цепи. Вновь установите напряжение U_1 . Повторите пункт 5.
8. Уменьшите поданное на конденсаторы напряжение U_1 до нулевого значения, соедините два конденсатора последовательно и подключите их к измерительной цепи. Вновь установите напряжение U_1 . Повторите пункт 5.
9. Уменьшите поданное напряжение и повторите пункты 3—8 с напряжением U_2 , указанным на установке.
10. Выключите питание обмотки РП и источник питания.

Таблица 1

Спецификация измерительных приборов

| Название прибора и его тип | Пределы измерения | Инструментальная погрешность |
|----------------------------|-------------------|------------------------------|
| | | |

Таблица 2

Измерение среднего тока разрядки конденсаторов

| Конденсатор | Ток разрядки $I_{\text{ср}}$, мкА | |
|-------------------|------------------------------------|-----------|
| | U_1 , В | U_2 , В |
| C_1 | | |
| C_2 | | |
| $C_{\text{пар}}$ | | |
| $C_{\text{посл}}$ | | |

4. Обработка результатов измерений

1. По формуле (5) вычислите емкость конденсаторов C_1 и C_2 . Используйте результаты измерений силы тока разрядки при напряжении U_1 .

2. По формуле (5) вычислите емкость параллельно и последовательно соединенных конденсаторов с емкостями $C_{\text{пар}}$ и $C_{\text{посл}}$. Используйте результаты измерений при напряжении U_1 .

3. Вычислите погрешность каждого из четырех полученных значений по формуле

$$\Delta C = C \sqrt{(\delta U)^2 + (\delta I)^2 + (\delta f)^2}.$$

4. Используя найденные в пункте 1 значения C_1 и C_2 , вычислите теоретическое значение емкости последовательно соединенных конденсаторов по формулам (5) и (6).

5. Используя найденные в пункте 3 значения, вычислите погрешность полученного в пункте 4 результата по формуле:

$$\Delta C_{\text{посл}}^{\text{теор}} = \frac{\sqrt{C_2^2 (\Delta C_1)^2 + C_1^2 (\Delta C_2)^2}}{C_1 + C_2}.$$

6. Используя найденные в пункте 1 значения C_1 и C_2 , вычислите теоретическое значение емкости параллельно соединенных конденсаторов по формулам (6) и (7).

7. Используя найденные в пункте 3 значения, вычислите погрешность полученного в пункте 6 результата по формуле:

$$\Delta C_{\text{пар}}^{\text{теор}} = \sqrt{(\Delta C_1)^2 + (\Delta C_2)^2}.$$

8. Повторите пункты 1—7 для результатов измерений, снятых при напряжении U_2 .

9. Запишите результаты для C_1 , C_2 , $C_{\text{пар}}$, $C_{\text{посл}}$, $\Delta C_{\text{пар}}^{\text{теор}}$, $\Delta C_{\text{пар}}^{\text{теор}}$ в стандартном виде.

10. Сравните значения емкостей, рассчитанных по результатам измерений при напряжении U_1 и U_2 .

5. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определение электроемкости уединенного проводника и конденсатора.
2. От чего зависит электроемкость уединенного проводника и конденсатора?
3. Что такое конденсатор и его практическое назначение?
4. Выведите формулу для электроемкости плоского, цилиндрического и сферического воздушного конденсатора.
5. Какое соединение конденсаторов называется последовательным, а какое параллельным?
6. От чего зависит скорость разрядки конденсатора?
7. Объясните суть метода периодической зарядки и разрядки конденсатора.
8. Какова роль поляризационного реле в экспериментальной установке?
9. Каким требованиям должен отвечать микроамперметр для измерения электроемкости конденсатора методом периодической зарядки и разрядки?
10. Можно ли использовать в лабораторной установке осциллограф вместо микроамперметра?
11. Выведите основную расчетную формулу для экспериментального определения электроемкости конденсатора.
12. Выведите выражение для электроемкости батареи параллельно и последовательно соединенных конденсаторов.
13. Выведите формулы для погрешности электроемкости конденсаторов, приведенные в данном описании.
14. Каковы источники методической погрешности в проведенном вами эксперименте?

Лабораторная работа № 24

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩЕГО ЭДС

Цель работы — изучение зависимости разности потенциалов на участке цепи, содержащем ЭДС, от силы тока; определение электродвижущей силы источника и полного сопротивления участка цепи.

1. Теоретические основы работы

Для того, чтобы в замкнутой цепи электрический ток существовал длительное время, кроме сил кулоновского взаимодействия зарядов необходимо наличие иных сил неэлектростатического происхождения, называемых сторонними силами. Если кулоновские силы вызывают соединение разноименных зарядов, то сторонние силы вызывают разделение разноименных зарядов. Сторонние силы действуют на носители зарядов внутри источников электрической энергии (гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы). В проводнике заряженные частицы движутся в направлении от точки с большим потенциалом φ_1 к точке с меньшим потенциалом φ_2 . Под действием сторонних сил свободные носители зарядов движутся внутри источника электрической энергии против сил электростатического поля. При этом сторонние силы совершают работу за счет энергии, затрачиваемой в источнике электрической энергии.

Отношение работы $A^{\text{кул}}$, совершаемой кулоновскими силами при переносе положительного точечного заряда q из точки 1 в точку 2 цепи (рис. 1), к значению этого заряда q называется разностью потенциалов точек 1 и 2:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = A^{\text{кул}}/q. \quad (1)$$

Электродвижущей силой (ЭДС) источника (рис. 1) называется отношение работы сторонних сил $A^{\text{стор}}$ по перемещению положительного точечного заряда q к значению этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A^{\text{стор}}}{q}. \quad (2)$$

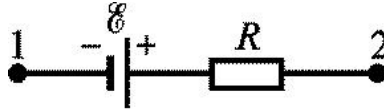


Рис. 1. Схема неоднородного участка цепи

Напряжением на участке цепи 1–2 называется физическая величина U_{12} , равная отношению суммарной работы всех сил A_{12} по переносу положительного точечного заряда q из точки 1 в точку 2 к значению этого заряда q :

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}. \quad (3)$$

С другой стороны, напряжение на участке 1–2 определяется следующим соотношением:

$$U_{12} = IR_{1-2},$$

где I — сила тока в цепи; R_{1-2} — электрическое сопротивление участка, включающее внутреннее сопротивление источника ЭДС на этом участке. Поэтому уравнение закона Ома для участка цепи, содержащего ЭДС, принимает вид:

$$IR_{1-2} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \sum_i \mathcal{E}_i. \quad (4)$$

Здесь $\sum_i \mathcal{E}_i$ — алгебраическая сумма ЭДС на участке цепи.

Значения \mathcal{E}_i принимаются положительными, если направление обхода от точки 1 к точке 2 соответствует перемещению внутри источника \mathcal{E}_i от полюса со знаком «−» к полюсу со знаком «+». В противном случае — отрицательными.

Участок цепи, в пределах которого не действуют сторонние силы, называется однородным, падение напряжение на нем $U_{1-2} = \varphi_1 - \varphi_2$, т.е. напряжение совпадает с разностью потенциалов.

Сила тока принимается с положительным знаком, если направление тока совпадает с направлением обхода участка цепи.

Применим обобщенный закон Ома к участку цепи 1– \mathcal{E} – R –2, изображенному на рис. 2. Выберем условно положительное направление тока, как показано на рисунке, и направление обхода от точки 1 к точке 2. Тогда для участка цепи 1– \mathcal{E} – R –2 получим

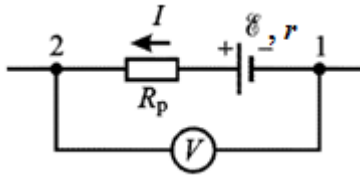


Рис. 2. Участок электрической цепи, содержащий ЭДС

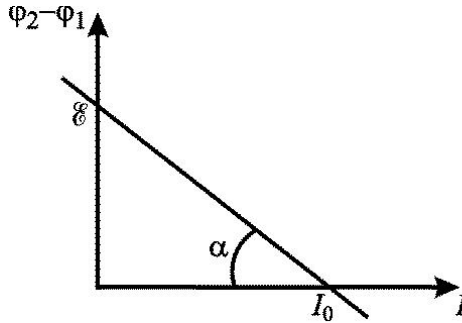


Рис. 3. Зависимость разности потенциалов на участке цепи от силы тока

$$I(R_p + r) = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}. \quad (5)$$

Здесь r — внутреннее сопротивление источника тока (ЭДС); R_p — сопротивление резистора.

Применяя закон Ома к участку $1-V-2$ (обход через вольтметр), получаем

$$I_B R_B = \varphi_1 - \varphi_2,$$

где I_B — сила тока, проходящего через вольтметр; R_B — сопротивление вольтметра.

Произведение $I_B R_B$ — это показание вольтметра равное разности потенциалов между точками подключения.

Обозначив полное сопротивление участка ($R_p + r$) через R , из выражения (5) получим

$$\varphi_1 - \varphi_2 = IR - \mathcal{E} \quad \text{или} \quad \varphi_2 - \varphi_1 = \mathcal{E} - IR. \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой уравнение прямой, изображенной на рис. 3 в координатах $(\varphi_2 - \varphi_1, I)$.

Из этого уравнения следует, что если сила тока в цепи равна нулю, то разность потенциалов равна электродвижущей силе \mathcal{E} источника, включенного в рассматриваемый участок,

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \mathcal{E}.$$

Полное сопротивление участка 1–2 можно определить по графику (рис. 3):

$$R = \frac{\mathcal{E}}{I_0}. \quad (7)$$

2. Описание экспериментальной установки

Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 4. Электрическая цепь состоит из исследуемого участка 1–2, содержащего источник тока с неизвестной ЭДС \mathcal{E}_{12} и резистор сопротивлением R_{12} , и внешнего участка цепи с регулируемой ЭДС $\mathcal{E}_{\text{вн}}$ и резистором $R_{\text{вн}}$. Внешняя ЭДС ($\mathcal{E}_{\text{вн}}$) может включаться согласно (рис. 4, а) или встречно (рис. 4, б) с ЭДС, входящей в исследуемый участок цепи 1–2 (\mathcal{E}_{12}). Сила тока в цепи измеряется амперметром A . Разность потенциалов на участке 1–2 измеряется вольтметром V .

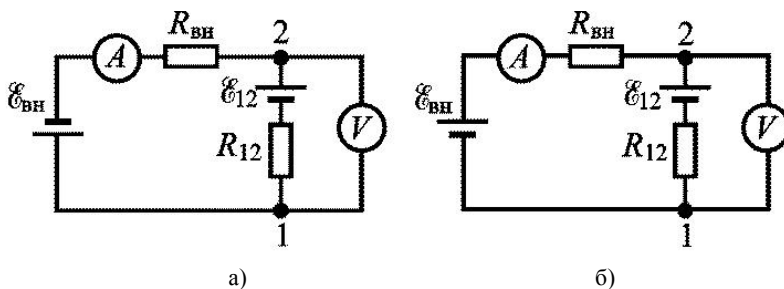


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема для согласного (а) и встречного (б) включения внешней ЭДС

Если выбрать направление обхода от точки 1 к точке 2 и принять условно положительное направление тока также от точки 1 к точке 2, то закон Ома для участка цепи 1–2 имеет вид

$$IR_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$$

или

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \mathcal{E}_{12} - IR_{12}, \quad (8)$$

а для замкнутой цепи

$$I(R_{12} + R_{\text{вн}}) = \mathcal{E}_{12} \pm \mathcal{E}_{\text{вн}}, \quad (9)$$

здесь знак «+» $\mathcal{E}_{\text{вн}}$ — для согласного включения (рис. 4, а) и «-» $\mathcal{E}_{\text{вн}}$ — для встречного включения источников ЭДС (рис. 4, б).

Из (9) может быть найдено выражение для силы тока в цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{12} \pm \mathcal{E}_{\text{вн}}}{R_{12} + R_{\text{вн}}}. \quad (10)$$

Как видно из (10), изменяя $\mathcal{E}_{\text{вн}}$, можно менять и силу тока в цепи. При согласном включении источников $\mathcal{E}_{\text{вн}}$ и \mathcal{E}_{12} сила тока I растет с ростом $\mathcal{E}_{\text{вн}}$. Из (8) видно, что разность потенциалов ($\varphi_2 - \varphi_1$) при этом линейно уменьшается и может достигнуть нулевого значения. При дальнейшем росте силы тока разность потенциалов на участке цепи меняет знак.

Если источник ЭДС $\mathcal{E}_{\text{вн}}$ включен навстречу источнику ЭДС \mathcal{E}_{12} , то сила тока I уменьшается с ростом $\mathcal{E}_{\text{вн}}$, а разность потенциалов ($\varphi_2 - \varphi_1$) увеличивается.

При $\mathcal{E}_{\text{вн}} = \mathcal{E}_{12}$ сила тока в цепи равна нулю. Согласно (8) разность потенциалов при этом равна электродвижущей силе, т.е. $\varphi_2 - \varphi_1 = \mathcal{E}_{12} = \mathcal{E}_{\text{вн}}$. Дальнейший рост приводит к изменению направления тока в цепи.

3. Порядок выполнения работы

1. Заполните табл. 1.

2. Соберите электрическую цепь с согласным включением источников ЭДС \mathcal{E}_{12} и $\mathcal{E}_{\text{ВН}}$ (рис. 4, а). Для измерения силы тока и разности потенциалов подключите необходимые приборы (если они не подключены).

3. Включите источники питания ИП1 (ЭДС \mathcal{E}_{12}) и ИП2 (ЭДС $\mathcal{E}_{\text{ВН}}$) и установите значение \mathcal{E}_{12} в пределах 4—6 В.

4. Изменяя значение $\mathcal{E}_{\text{ВН}}$ от нуля до значения, указанного преподавателем, снимите 5—6 точек зависимости разности потенциалов от силы тока в цепи. Добейтесь изменения знака разности потенциалов и определите еще 5 точек аналогичной зависимости в этой области. Результаты измерений запишите в табл. 2.

5. Уменьшите значение ЭДС $\mathcal{E}_{\text{ВН}}$ до нуля, выключите источники питания и переключите полярность $\mathcal{E}_{\text{ВН}}$ (рис. 4, б), получив схему, соответствующую встречному включению источников ЭДС \mathcal{E}_{12} и $\mathcal{E}_{\text{ВН}}$.

6. Проведите измерения зависимости разности потенциалов от силы тока, увеличивая $\mathcal{E}_{\text{ВН}}$ от нуля до значения, при котором сила тока в цепи изменит знак. Проведите несколько измерений в области отрицательных значений силы тока. Результаты запишите в табл. 3.

Таблица 1

Спецификация измерительных приборов

| Название прибора и его тип | Пределы измерения | Инструментальная погрешность |
|----------------------------|-------------------|------------------------------|
| | | |

Таблица 2

Зависимость разности потенциалов от силы тока (согласное включение источников ЭДС $\mathcal{E}_{\text{ВН}}$ и \mathcal{E}_{12})

| № | I, A | $\varphi_2 - \varphi_1, \text{В}$ |
|---|---------------|-----------------------------------|
| | | |

**Зависимость разности потенциалов от силы тока
(встречное включение источников ЭДС $\mathcal{E}_{\text{вн}}$ и \mathcal{E}_{12})**

| № | I, A | $\varphi_2 - \varphi_1, \text{В}$ |
|---|---------------|-----------------------------------|
| | | |

4. Обработка результатов измерений

1. Постройте график зависимости $\varphi_2 - \varphi_1 = f(I)$.
2. По точке пересечения графика с осью абсцисс определите значение неизвестной ЭДС \mathcal{E}_{12} .
3. По формуле (7) определите электрическое сопротивление исследуемого участка цепи R_{12} .
4. Оцените погрешности измерения \mathcal{E}_{12} и R_{12} по методике определения погрешности физических величин, которые определяются по графикам (см. Приложение 1). Запишите результаты измерений в стандартной форме.

5. Контрольные вопросы

1. Что называется напряженностью электростатического поля?
2. Что называется разностью потенциалов электростатического поля?
3. Что называется электродвижущей силой?
4. Что называется напряжением на участке цепи?
5. Запишите закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС.
6. Сформулируйте правило знаков при записи закона Ома для участка цепи, содержащего источник ЭДС.
7. Что такое согласное включение источников ЭДС?
8. Что такое встречное включение источников ЭДС?
9. Как определяется значение ЭДС внешнего источника?
10. Как определяется полное сопротивление участка $1-R_{12}-\mathcal{E}_{12}-2$?
11. При каком соединении источников ЭДС разность потенциалов на участке $1-2$ падает с ростом силы тока?
12. При каком соединении источников ЭДС сила тока принимает нулевое значение?
13. При каких условиях ток на участке $1-R_{12}-\mathcal{E}_{12}-2$ меняет направление?

РАЗДЕЛ «МАГНЕТИЗМ»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 25

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ НА ОСИ СОЛЕНОИДА И КОРОТКОЙ КАТУШКИ

Цель работы — измерение магнитной индукции поля, создаваемого соленоидом и короткой катушкой, с помощью индукционного датчика.

1. Теоретические основы работы

Силовой характеристикой магнитного поля является магнитная индукция B . Магнитная индукция численно равна отношению максимальной силы F_{\max} , действующей на элемент проводника длиной dl с током I к произведению Idl , называемому элементом тока,

$$B = \frac{dF_{\max}}{Idl}. \quad (1)$$

Для расчета магнитной индукции поля, создаваемого тонким проводником с током (рис. 1), можно использовать закон Био—Савара—Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}, \quad (2)$$

где $d\vec{B}$ — магнитная индукция поля, создаваемого элементом тока $I d\vec{l}$; \vec{r} — вектор, проведенный от элемента тока Idl в точку A , в которой рассчитывается магнитная индукция; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Магнитная индукция поля, создаваемого в точке A всем проводником длиной l с током I , рассчитывается с использованием метода суперпозиции полей. Для этого соотношение (2) интегрируется по всей длине проводника

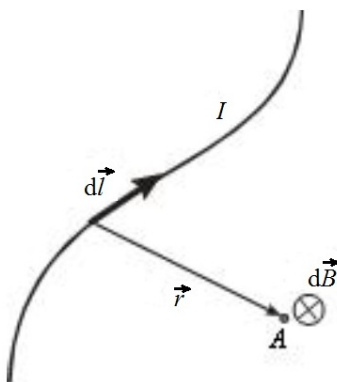


Рис. 1. К расчету магнитной индукции по закону Био—Савара—Лапласа

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}. \quad (3)$$

Используя (3), можно получить выражение для магнитной индукции на оси витка радиусом R с током I :

$$B(x) = \frac{\mu_0 I R^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

где x — координата точки, в которой рассчитывается магнитная индукция. Ось x перпендикулярна плоскости витка и проходит через его центр. Начало отсчета оси x взято в центре витка.

В случае катушки с током I , имеющей радиус витков R и длину l , магнитная индукция на оси определяется выражением

$$B = \frac{\mu_0 I n}{2} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1), \quad (5)$$

где $n = N/l$ — число витков на единицу длины катушки; углы β_1 и β_2 определяют положение точки A на оси катушки, в которой вычисляется магнитная индукция (рис. 2).

Для длинного соленоида ($l \gg 2R$; $\beta_1 \rightarrow 0$ и $\beta_2 \rightarrow \pi$) выражение (5) принимает вид

$$B = \mu_0 I n. \quad (6)$$

Формула (6) определяет магнитную индукцию на оси симметрии внутри длинного соленоида в точках, удаленных от его торцов.

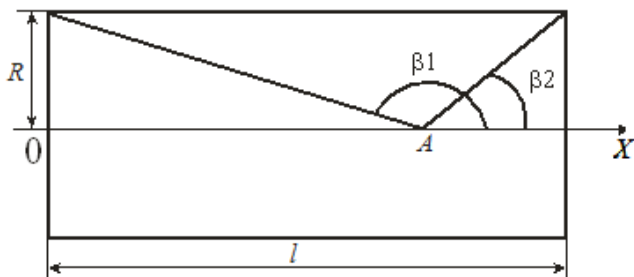


Рис. 2. К определению магнитной индукции на оси катушки с током

Для экспериментального определения магнитной индукции используется метод, основанный на измерении ЭДС электромагнитной индукции, возникающей в измерительной рамке — индукционном датчике. Рамка находится внутри соленоида (катушки), который питается переменным током промышленной частоты ($\omega = 314$ рад/с). Так как ток в соленоиде (катушке) меняется по гармоническому закону, то значение магнитной индукции в любой точке на оси изменяется по закону

$$B = B_m \cos \omega t, \quad (7)$$

где B_m — амплитудное значение магнитной индукции.

Измерительная рамка закреплена на штоке, который может перемещаться вдоль оси соленоида (катушки), а плоскость ее витков перпендикулярна оси. Радиус рамки $r_p \ll R$, поэтому магнитную индукцию в пределах рамки можно считать постоянной. Тогда для магнитного потока Φ через площадь рамки можно записать

$$\Phi = BS_p, \quad (8)$$

где S_p — площадь рамки.

Согласно закону Фарадея—Максвелла в рамке индуцируется ЭДС

$$\mathcal{E}_i = -N_p \frac{d\Phi}{dt}, \quad (9)$$

где N_p — число витков рамки.

Из (7)—(9) следует:

$$\mathcal{E}_m = N_p S_p B_m \omega \sin \omega t.$$

Отсюда

$$B_m = \frac{\mathcal{E}_m}{N_p S_p \omega}. \quad (10)$$

2. Описание установки и метода измерений

Схема лабораторной установки приведена на рис. 3. Она включает соленоид 1 с плотно навитой обмоткой радиусом R , подвижную катушку 2 с витками радиусом R и измерительную рамку 3 (ИР) с витками радиусом R_p .

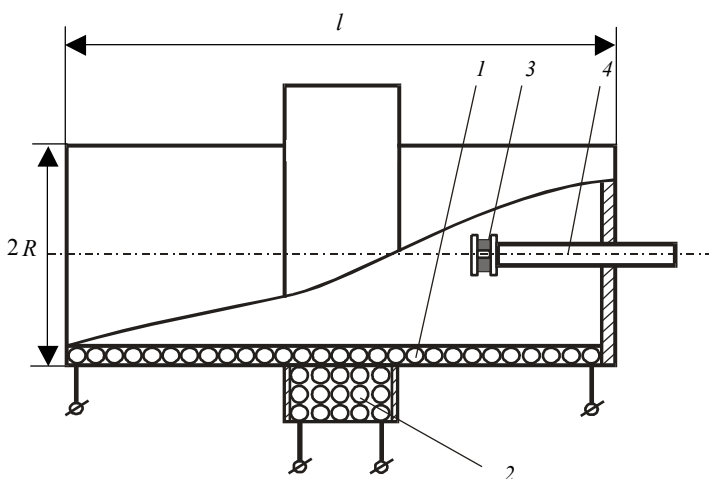


Рис. 3. Схема лабораторной установки

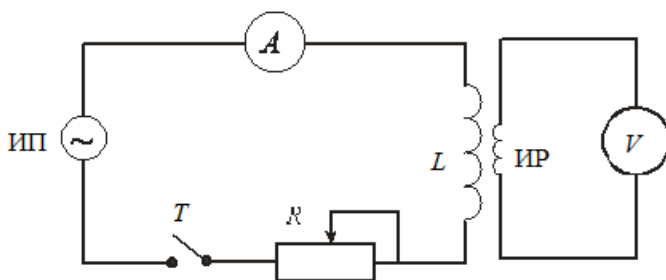


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема установки

Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 4. Переменное напряжение подается на соленоид или катушку L от источника питания ИП, смонтированного в блоке коммутации через тумблер T , и может регулироваться с помощью резистора R . Сила тока в цепи измеряется амперметром A . Измерение ЭДС, индуцированной в измерительной рамке ИР, производится вольтметром V .

Измерительная рамка перемещается вдоль оси на подвижном штоке и подключена к вольтметру с помощью кабеля.

3. Порядок выполнения работы

1. Заполните табл. 1.

2. Тарировка индукционного датчика:

— проверьте правильность соединения электрической цепи согласно принципиальной схеме (рис. 4);

— подключите к источнику питания обмотку соленоида (с помощью соединительных проводов или тумблера);

— включите электропитание стенда, блока коммутации и измерительных приборов;

— переместите шток с измерительной рамкой так, чтобы измерительная рамка (индукционный датчик) оказалась в центре соленоида («0» по шкале на штоке);

— установите с помощью резистора R силу тока в соленоиде в пределах, указанных преподавателем, измерьте ЭДС электромагнитной индукции \mathcal{E}_i . Результаты измерения запишите в табл. 2.

3. Измерение магнитной индукции в различных точках на оси соленоида (x — координата на оси соленоида, отсчитываемая от его середины):

— установите силу тока в соленоиде по указанию преподавателя;

— перемещая шток с индукционным датчиком вдоль оси соленоида с интервалом $\Delta x = 1$ см, измерьте ЭДС электромагнитной индукции в измерительной рамке. Начальное положение датчика должно быть левее середины соленоида на 2 см. Полученные данные запишите в табл. 3;

— выключите электропитание измерительных приборов и лабораторного стенда.

4. Измерение магнитной индукции в различных точках на оси короткой катушки:

— подключите к источнику питания обмотку катушки (с помощью соединительных проводов или тумблера);

— включите электропитание стенда, блока коммутации и измерительных приборов;

— установите силу тока в катушке по указанию преподавателя;

— переместите шток с измерительной рамкой вдоль оси катушки, найдите ее середину (при этом вольтметр показывает максимальное значение индуцируемой ЭДС);

— введите шток от найденного положения середины катушки на $x_0 = 2$ см, измерьте значение ЭДС в этом положении;

— проведите измерение ЭДС электромагнитной индукции в измерительной катушке, перемещая каждый раз шток с индукционным датчиком на $\Delta x = 1$ см. Результаты измерений запишите в табл. 4;

— выключите электропитание измерительных приборов и лабораторного стенда.

Примечание. Во избежание перегрева обмотки соленоида рекомендуется выключать тумблер T на время пауз при проведении измерений.

Т а б л и ц а 1

Спецификация измерительных приборов

| Название прибора и его тип | Пределы измерения | Инструментальная погрешность |
|----------------------------|-------------------|------------------------------|
| | | |

Т а б л и ц а 2

Зависимость ЭДС электромагнитной индукции \mathcal{E} от силы тока в соленоиде

| № | I_c, A | \mathcal{E}_i, B | $B, Tл$ | $N_p S_p, м^2$ |
|---------|----------|--------------------|---------|----------------|
| | | | | |
| | | | | |
| Среднее | — | — | — | |

Т а б л и ц а 3

Зависимость магнитной индукции на оси соленоида от координаты

| № | Положение датчика $x, см$ | \mathcal{E}_i, B | $B, Tл$ |
|---|---------------------------|--------------------|---------|
| | | | |

Т а б л и ц а 4

Зависимость магнитной индукции на оси катушки от координаты

| № | Положение датчика $x, см$ | \mathcal{E}_i, B | $B, Tл$ |
|---|---------------------------|--------------------|---------|
| | | | |

4. Обработка результатов измерений

1. Используя данные табл. 2, по формуле (6) вычислите значение магнитной индукции B для различных значений силы тока соленоида I_c . Результаты расчета запишите в табл. 2.

2. Используя формулу (10), определите произведение $N_p S_p$ числа витков измерительной рамки на ее площадь и найдите его среднее значение.

3. Используя данные табл. 3 для ξ_i , по формуле (10) вычислите магнитную индукцию для каждого фиксированного положения измерительной рамки на оси соленоида (среднее значение $N_p S_p$ возьмите из табл. 2). Результаты вычислений запишите в табл. 3.

4. Используя данные табл. 3 для ξ_i по формуле (10) вычислите магнитную индукцию для каждого фиксированного положения измерительной рамки на оси катушки. Результаты вычислений запишите в табл. 4.

5. По данным табл. 3 и табл. 4 постройте график зависимости $B = B(x)$ для соленоида и короткой катушки (на одной координатной сетке).

6. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности δB и ΔB для одного из измеренных значений по указанию преподавателя по следующим формулам:

$$\delta B = \sqrt{\delta \xi_i^2 + \delta(N_p S_p)^2}, \quad \Delta B = B \delta B,$$

$$\text{здесь } \delta(N_p S_p) = \sqrt{\delta \xi_i^2 + \delta I^2}.$$

7. Запишите для выбранного в пункте 6 значения магнитной индукции окончательный результат в стандартной форме.

5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение магнитной индукции.
2. Сформулируйте закон Био—Савара—Лапласа.
3. Выведите формулу для расчета магнитной индукции на оси длинного соленоида.
4. Постройте графики зависимости $B = B(x)$ для соленоида и короткой катушки.
5. Изобразите качественно картину линий магнитной индукции поля, созданного соленоидом и короткой катушкой.
6. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
7. Поясните принцип действия индукционного датчика.

8. Выведите формулу для расчета относительной погрешности определения магнитной индукции соленоида.

9. Как рассчитать относительную погрешность определения произведения $N_p S_p$?

10. Выведите формулу для расчета магнитной индукции поля катушки в точках на оси, перпендикулярной плоскости катушки и проходящей через ее центр.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 26

ИЗУЧЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ

Цель работы — экспериментальное изучение закона Ампера; определение магнитной индукции в воздушном зазоре постоянного магнита.

1. Теоретические основы работы

На элемент $d\vec{l}$ проводника с током I , находящегося в магнитном поле с индукцией \vec{B} (рис. 1), действует сила $d\vec{F}$, значение которой определяется законом Ампера:

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}]. \quad (1)$$

На прямолинейный проводник длиной b с током I , расположенный перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля, действует сила, значение которой находится интегрированием силы (1) по длине проводника:

$$F_A = \int_0^b dF = IBb, \quad (2)$$

где I — сила тока в проводнике; b — длина проводника; B — магнитная индукция.

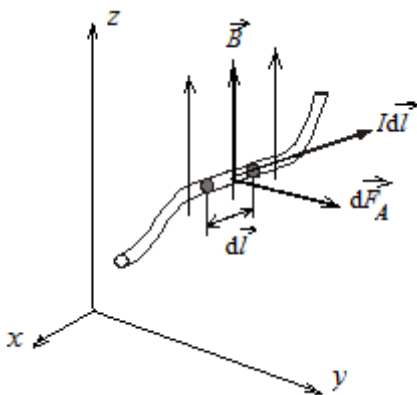


Рис. 1. Определение силы, действующей на элемент тока в магнитном поле

Для проверки закона Ампера удобно использовать стандартную магнитоэлектрическую систему, широко применяемую в приборах для измерения силы постоянного тока (амперметрах). Магнитное поле такой системы создается в малом кольцевом зазоре I постоянными магнитами 2 и 4 (рис. 2). В пределах зазора линии магнитного поля направлены радиально, поэтому значение магнитной индукции зависит только от расстояния до точки O (значения модулей сил Ампера на рис. 2, *а* и рис. 2, *б* одинаковы). Если в такое магнитное поле поместить рамку 3 с током I , свободно вращающуюся вокруг оси O , то на нее будет действовать пара сил Ампера, момент которой не зависит от угла поворота рамки.

Поскольку ось вращения O рамки 3 горизонтальна (в данной работе ось вращения всегда направлена горизонтально), момент сил Ампера $\vec{M}_O(F_A)$, приложенных к рамке 3 (рис. 2), можно уравновесить моментом силы тяжести $\vec{M}_O(mg)$, действующей на груз 5, закрепленный на тонком стержне 6, жестко связанном с рамкой. Момент силы тяжести, в отличие от момента силы Ампера, возрастает с увеличением угла поворота рамки, и при определенном значении этого угла, т.е. при определенном значении силы тока через рамку, достигаются условия равновесия рамки (3). Значение проекции момента сил Ампера на ось вращения O можно определить по углу поворота α рамки, при котором достигается механическое равновесие (рис. 3):

$$M(F_A) = M(mg). \quad (3)$$

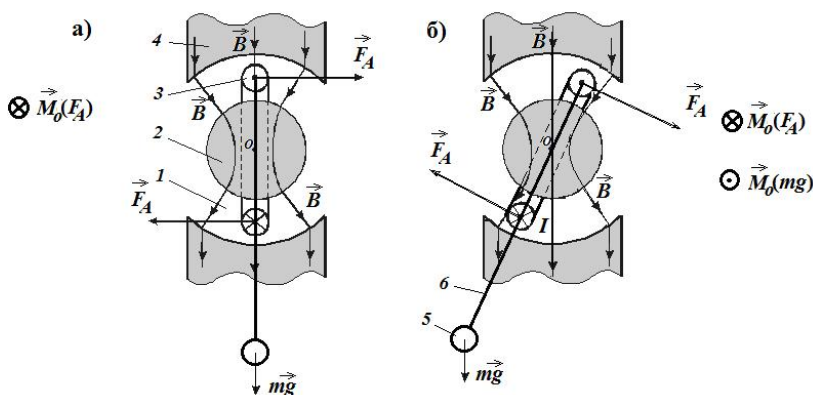


Рис. 2. Рамка с током в радиальном магнитном поле. Значения модулей сил Ампера одинаковы (*а*, *б*)

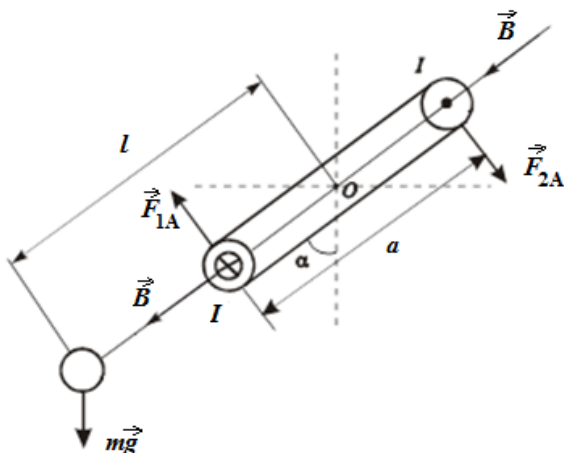


Рис. 3. Уравновешивание момента сил Ампера моментом силы тяжести

Проекция момента сил Ампера относительно полюса O на ось вращения зависит от значения магнитной индукции в тех точках пространства, где расположены стороны рамки, параллельные оси вращения, от силы тока в рамке, ее геометрических размеров, числа витков N намотанного на нее провода:

$$M(F_A) = F_A a N, \quad (4)$$

где $M(F_A)$ — проекция момента сил Ампера на ось вращения рамки; F_A — сила Ампера; N — число витков; a — ширина рамки (рис. 3).

Из (2) и (4) имеем

$$M(F_A) = I B b a N, \quad (5)$$

где b — длина рамки.

Из (3) и (4) и рис. 3 следует:

$$F_A a N = m g l \sin \alpha, \quad (6)$$

где I — сила тока в рамке; B — магнитная индукция; a — ширина рамки; l — расстояние от центра масс груза до оси вращения рамки; m — масса груза; N — число витков рамки; α — равновесный угол поворота рамки.

Из (6) следует:

$$F_A = \frac{mgl}{aN} \sin \alpha. \quad (7)$$

2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка представляет собой закрепленную в прозрачном корпусе 1 (рис. 4, а) магнитоэлектрическую систему 2, измерительная рамка которой находится в радиальном поле постоянных магнитов, как это показано на рис. 2. В отсутствие тока в рамке тонкий стержень 3 с закрепленным на конце грузом 4 занимает вертикальное положение (рис. 4, а). Для измерения углов отклонения стержня 3 в зависимости от силы тока в рамке используется угломер 5 (транспортёр). Корпус 1 может поворачиваться вокруг горизонтальной оси шарнира 6, закрепленного на подставке 7.

Для учета момента упругих сил $M(F_y)$, возникающих в свернутых в виде спирали проводниках, соединяющих подвижную рамку с неподвижными элементами электрической схемы, необходимо повернуть корпус 1 вокруг оси 6 из положения, показанного на рис. 4, а, в положение, показанное на рис. 4, б, и измерить угол β отклонения груза от горизонтали. По углу β можно определить коэффициент упругости (жесткости) подвески k , который используется для расчета силы Ампера (8).

Так как $M(F_y) = k\beta$, то при равновесии рамки с грузом момент силы тяжести равен моменту упругих сил (рис. 4, б):

$$mgl \cos \beta = k\beta,$$

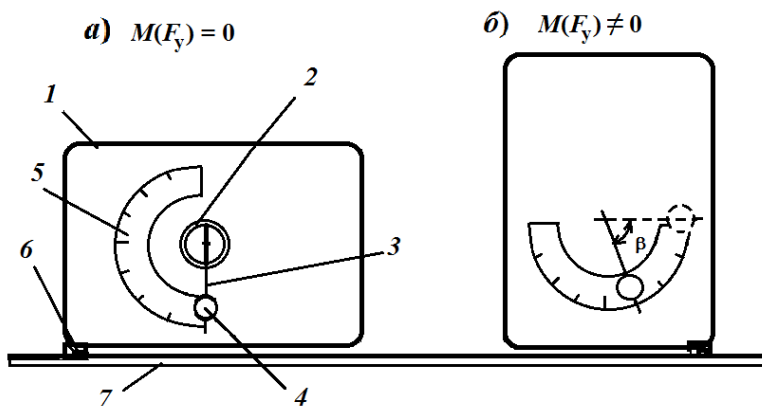


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

где β — угол отклонения груза от горизонтали под действием момента упругих сил, возникающих при повороте корпуса l .

Отсюда

$$k = \frac{mgl \cos \beta}{\beta}.$$

С учетом момента упругих сил условие равновесия принимает вид

$$F_A aN = mgl \sin \alpha + k\alpha, \quad (8)$$

а выражение (7)

$$F_A = \frac{mgl \sin \alpha}{aN} + \frac{mgl \cos \beta}{aN\beta} \alpha = \frac{mgl}{aN} \left(\sin \alpha + \frac{\alpha}{\beta} \cos \beta \right). \quad (9)$$

3. Порядок выполнения работы

1. Заполните табл. 1.

2. Измерьте зависимость угла поворота α рамки с грузом от силы тока I в рамке:

— подключите электропитание установки. Регулятор напряжения на источнике питания установите в крайнее левое положение;

— подсоедините прибор для измерения силы тока в рамке;

— произведите измерение силы тока в рамке для углов отклонения от 5 до 45° с заданным преподавателем шагом. Результаты измерений запишите в табл. 2.

— выключите электропитание. Положите модуль лабораторной работы на левую боковую грань и измерьте угол β отклонения груза от горизонтали (рис. 4), результат измерений запишите после табл. 2.

Таблица 1

Спецификация измерительных приборов

| Название прибора и его тип | Пределы измерения | Инструментальная погрешность |
|----------------------------|-------------------|------------------------------|
| | | |

Таблица 2

Зависимость угла отклонения от силы тока в рамке

| № | I, A | $\alpha, ^\circ$ | F_A, H |
|---|--------|------------------|----------|
| | | | |

4. Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 2 рассчитайте по формуле (9) значения силы Ампера и результаты запишите в ту же таблицу.

2. Постройте график зависимости силы Ампера от силы тока в рамке, проведя через экспериментальные точки прямую, выходящую из начала координат.

3. Используя выражение (2), найдите по тангенсу угла наклона прямой ($\operatorname{tg}\gamma$) на графике значение магнитной индукции B в воздушном зазоре постоянного магнита.

4. Используя графическую обработку результатов измерений, рассчитайте погрешность измерения ΔF_A и ΔB по формулам:

$$\delta B = \sqrt{(\delta \operatorname{tg}\gamma)^2 + (\delta b)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F_A}{F_A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2};$$

$$\Delta B = \delta B \cdot B;$$

$$\Delta F_A =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\partial F_A}{\partial l}\right)^2 (\Delta l)^2 + \left(\frac{\partial F_A}{\partial a}\right)^2 (\Delta a)^2 + \left(\frac{\partial F_A}{\partial \alpha}\right)^2 (\Delta \alpha)^2 + \left(\frac{\partial F_A}{\partial \beta}\right)^2 (\Delta \beta)^2}.$$

Запишите окончательный результат в стандартной форме.

5. Контрольные вопросы

1. Запишите закон Ампера.
2. Запишите условие равновесия рамки с учетом момента упругих сил.
3. Какова зависимость силы Ампера от силы тока в витках рамки?
4. Каким образом в данной лабораторной работе можно оценить работу сил Ампера?
5. Что такое пара сил?
6. Выведите формулу для относительной погрешности магнитной индукции в воздушном зазоре постоянного магнита.
7. Приведите вывод формулы для относительной погрешности силы Ампера.
8. В чем заключается методика определения значения момента упругих сил подводных проводов, используемая в данной работе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 27 (1)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Цель работы — изучение траектории движения электрона во взаимно перпендикулярных магнитном и электрическом полях; определение удельного заряда электрона.

1. Теоретические основы работы

Сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле с индукцией \vec{B} и в электрическом поле с напряженностью \vec{E} (сила Лоренца), определяется по формуле

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}],$$

где q — заряд частицы; \vec{v} — скорость частицы.

На заряженную частицу, движущуюся только в магнитном поле со скоростью \vec{v} , действует сила

$$\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}].$$

Эта сила является магнитной составляющей силы Лоренца. Сила, действующая со стороны магнитного поля на частицу, перпендикулярна векторам \vec{v} и \vec{B} и, следовательно, не совершает работы, а лишь искривляет траекторию движения частицы, не меняя ее энергии.

В однородном магнитном поле с вектором, направленным перпендикулярно к скорости движения частицы, частица равномерно движется по окружности, плоскость которой перпендикулярна вектору \vec{B} (рис. 1). Направление отклонения частицы зависит от знака ее заряда. Уравнение движения частицы (в проекции на ось, направленную к центру окружности радиусом R) имеет вид

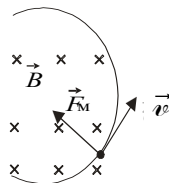


Рис. 1. Движение положительно заряженной частицы в однородном магнитном поле

$$\frac{mv^2}{R} = |q|vB. \quad (1)$$

В однородном магнитном поле, в котором направление скорости движения частицы \vec{v} составляет угол α с вектором \vec{B} , частица движется по винтовой линии с осью, направленной вдоль линии индукции магнитного поля: она равномерно вращается по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору \vec{B} , со скоростью $v_{\perp} = v \sin \alpha$ и движется поступательно вдоль вектора \vec{B} с постоянной скоростью $v_{\parallel} = v \cos \alpha$.

Для определения отношения заряда электрона к его массе (удельного заряда) можно воспользоваться формулой (1), описывающей его движение в магнитном поле, магнитная индукция которого перпендикулярна вектору скорости. Из (1) следует, что

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{RB}.$$

Здесь необходимо знать индукцию магнитного поля B , скорость электрона v и радиус кривизны его траектории R .

Рассмотрим движение электрона в системе, состоящей из двух коаксиальных цилиндрических электродов, помещенных в однородное магнитное поле (рис. 2).

Центральный электрод радиусом r_k является катодом, внешний электрод радиусом r_a — анодом. Электроны, испускаемые катодом, движутся во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях от катода к аноду в плоскости, перпендикулярной оси Z .

Для описания движения электрона в указанных условиях удобно использовать цилиндрическую систему координат (рис. 3), в которой положение электрона полностью определяется расстоянием от оси r , азимутальным углом φ и смещением z .

Момент импульса электрона относительно некоторого полюса O :

$$\vec{L}_O = \left[\vec{r}, m\vec{v} \right] = \left[\vec{r}, m \left(\vec{v}_r + \vec{v}_{\varphi} \right) \right]. \quad (2)$$

Проекция момента импульса электрона на ось OZ равна

$$L_z = r m v_{\varphi}. \quad (3)$$

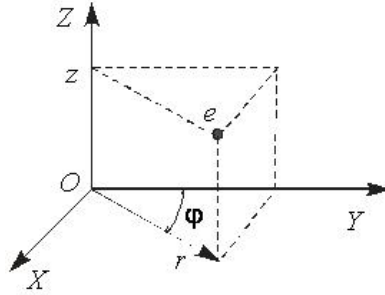
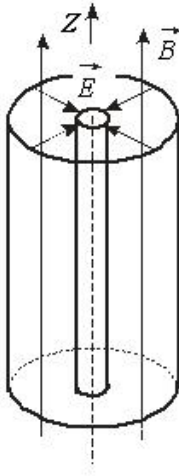


Рис. 3. Цилиндрическая система координат

← Рис. 2. Цилиндрический диод, помещенный в однородное магнитное поле

где v_φ — составляющая скорости, перпендикулярная радиусу r , равная

$$v_\varphi = r \frac{d\varphi}{dt}. \quad (4)$$

Проекция на ось OZ момента сил, действующих на электрон, определяется составляющей магнитной силы, перпендикулярной r . Электрическая сила и составляющая магнитной силы, направленная вдоль радиуса r , момента относительно оси OZ не создают. Таким образом, получим

$$M_z = rF_\varphi = re v_r B, \quad (5)$$

где $v_r = \frac{dr}{dt}$ — радиальная составляющая скорости электрона. Уравнение моментов в проекции на ось OZ с учетом (3) и (5) имеет вид

$$\frac{d(m v_\varphi r)}{dt} = re v_r B = re B \frac{dr}{dt}, \quad (6)$$

или

$$\frac{d(m v_\varphi r)}{dt} = \frac{1}{2} e B \frac{d(r^2)}{dt}. \quad (7)$$

После интегрирования (7) получим

$$rm v_{\varphi}^2 = \frac{1}{2} eBr^2 + \text{const.}$$

Константу найдем из начальных условий: при $r = r_k$ (где r_k — радиус катода), $v_{\varphi} = 0$. Тогда

$$\begin{aligned} \text{const} &= -\frac{1}{2} eBr_k^2; \\ v_{\varphi}^2 &= \frac{1}{2} \frac{eB}{mr} (r^2 - r_k^2). \end{aligned} \quad (8)$$

Кинетическая энергия электрона в точке с координатой r равна работе сил электрического поля (считаем, что начальная скорость электрона равна нулю):

$$\frac{m(v_{\varphi}^2 + v_r^2)}{2} = eU, \quad (9)$$

где U — разность потенциалов между катодом и точкой поля, в которой находится электрон.

Подставляя в (9) выражение для v_{φ} из (8), получаем

$$eU = \frac{m}{2} \left[v_r^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{e}{m} \right)^2 \frac{B^2}{r^2} (r^2 - r_k^2)^2 \right]. \quad (10)$$

При произвольном значении магнитной индукции в формуле (10) остаются неизвестными разность потенциалов U , которую прошел электрон от катода до точки с координатой r , и радиальная компонента скорости v_r в этой точке. Изменяя значение магнитной индукции B , можно реализовать ситуацию, когда эти величины будут известны. На рис. 4, *a* показано, как изменяется траектория электрона с ростом магнитной индукции (кривая 1 соответствует $B = 0$). При некотором значении магнитной индукции, которое называют критическим $B_{кр}$, электроны подлетают к аноду по касательной (кривая 3 на рис. 4, *a*), при этом $r = r_a$; $U = U_a$; $v_r = 0$. В этом случае уравнение (10) принимает вид

$$eU_a = \frac{m}{8} \left[\left(\frac{e}{m} \right)^2 \frac{B_{\text{кр}}^2}{r_a^2} \left(r_a^2 - r_k^2 \right)^2 \right], \quad (11)$$

где U_a — анодное напряжение (разность потенциалов между анодом и катодом); r_a — радиус анода. Момент достижения магнитной индукцией критического значения можно определить по резкому спаду анодного тока, поскольку электроны перестают долетать до анода (кривая 3 на рис. 4, б). Из формулы (11) по величине магнитной индукции, соответствующей критическому значению, находим

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{\text{кр}}^2 r_a^2 \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2} \right)^2}. \quad (12)$$

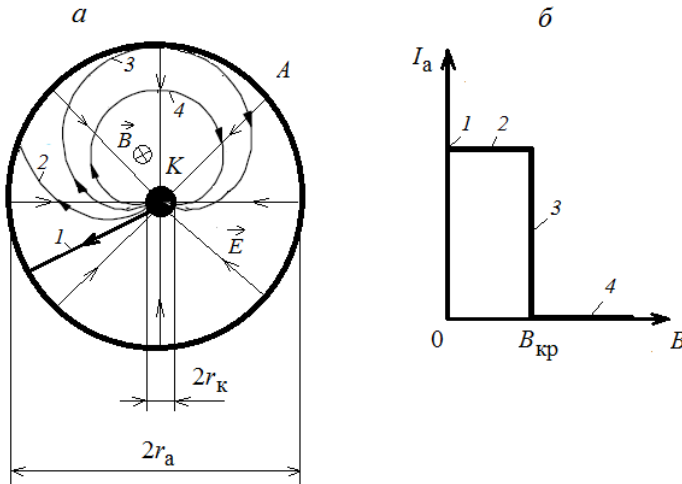


Рис. 4. Зависимость траектории электронов в поперечном сечении вакуумного диода (а) и зависимость анодного тока от индукции магнитного поля (б) при отсутствии начальной скорости электронов:

1 — $B = 0$; 2 — $B < B_{\text{кр}}$; 3 — $B = B_{\text{кр}}$; 4 — $B > B_{\text{кр}}$; K — катод, A — анод

В зависимости от конструкции вакуумного диода радиус катода может быть мал по сравнению с радиусом анода ($r_k \ll r_a$), тогда из (12) следует

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2}. \quad (13)$$

2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 5, а) состоит из соленоида 1 и вакуумного диода 2. Соленоид представляет собой цилиндрический каркас, на который намотано N витков провода. Длина соленоида в несколько раз превышает его диаметр, поэтому вдали от краев, там, где располагается вакуумный диод, магнитное поле можно считать однородным.

Катод 3 и анод 4 вакуумного диода образуют соосную с соленоидом цилиндрическую систему. Катод 4 нагревается с помощью встроенного нагревателя с наружными контактами 5. Закрытый с одной из торцевых сторон цилиндрический анод имеет внешний контакт 6 (рис. 5, а).

Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 5, б. Здесь 1 — соленоид; 2 — диод; А1 — амперметр, измеряющий силу тока соленоида; А2 — амперметр, измеряющий силу анодного тока; ИП-1 — источник питания соленоида; ИП-2 — источник питания вакуумного диода.

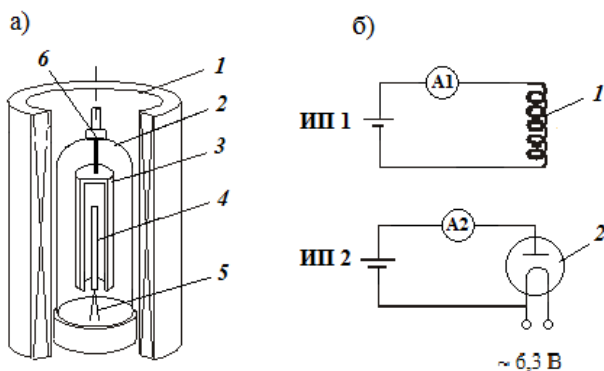


Рис. 5. Схема экспериментальной установки (а) и принципиальная электрическая схема (б)

3. Порядок выполнения работы

1. Заполните табл. 1.
2. Включите электропитание установки и измерительных приборов.
3. Установите анодное напряжение, значение которого рекомендовано преподавателем.
4. Увеличивая силу тока в соленоиде от минимального значения до максимального с шагом 0,1 А, измерьте зависимость анодного тока I_a от тока соленоида I_c . Результаты измерений запишите в табл. 2.
5. Повторите измерения для другого значения анодного напряжения, указанного преподавателем.

Таблица 1

Спецификация измерительных приборов

| Название прибора и его тип | Пределы измерения | Инструментальная погрешность |
|----------------------------|-------------------|------------------------------|
| | | |

Данные установки:

- Число витков соленоида $N = 2500$;
 Длина соленоида $l = 170$ мм;
 Внутренний диаметр соленоида $d = 25$ мм;
 Внутренний радиус анода $r_a = 5,0$ мм;
 Радиус катода $r_k = 0,45$ мм.

Таблица 2

Зависимость силы анодного тока от силы тока в соленоиде

| № | $U_a, \text{В}$ | | $U_a, \text{В}$ | |
|---|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| | $I_c, \text{А}$ | $I_a, \text{мА}$ | $I_c, \text{А}$ | $I_a, \text{мА}$ |
| | | | | |

4. Обработка результатов измерений

1. Для каждого значения анодного напряжения постройте график зависимости $I_a = f(I_c)$. Полученная экспериментальная зависимость (рис. 6) существенно отличается от идеализированной зависимости $I_a = f(B)$ (рис. 4, б), так как начальные скорости электронов, испускаемые поверхностью нагретого катода, не равны нулю, а имеют различные значения. Критические условия достигаются поэтому для разных

электронов при разных значениях индукции магнитного поля. Кривая зависимости $I_a(B)$ приобретает вследствие этого вид линии, изображенной на рис. 6.

Конструктивные особенности вакуумного диода (отклонения от коаксиальности катода и анода, отклонение вектора индукции магнитного поля от оси диода и т.д.) приводят к дополнительному сглаживанию кривой (рис. 6).

После спада ток диода не становится равным нулю. Эту особенность можно объяснить наличием в диоде продольных составляющих электрического поля. Магнитное поле отклоняет траектории электронов от боковых стенок анода, но не может перекрыть поток электронов, движущихся вдоль оси диода. В результате, часть электронов, выходящих из верхнего конца катода 4, попадает не на боковые стенки, а на верхний торец 3 анодного цилиндра (рис. 5, а), создавая анодный ток диода.

Для определения значения критической силы тока $I_{с.кр}$, соответствующей критическому значению магнитной индукции $B_{кр}$, на полученном графике $I_a = f(I_c)$ (рис. 6) проведите до пересечения две прямые: одну через точки до спада анодного тока, другую — через точки, образующие линейный участок в области спада анодного тока. Точка пересечения этих прямых будет соответствовать значению $I_{с.кр}$ и, следовательно, $B_{кр}$ в формуле (12), так как эта формула была получена при условии отсутствия начальной скорости электронов, эмитированных катодом.

Ввиду того, что $r_a \gg r_k$, можно использовать формулу (13).

Рассчитайте соответствующее критическое значение магнитной индукции по формуле для короткого соленоида:

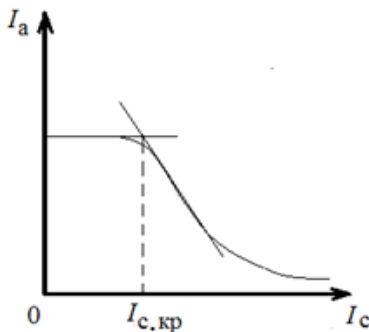


Рис. 6. Зависимость анодного тока I_a от тока в обмотке соленоида I_c

$$B_{\text{кр}} = \frac{\mu_0 N I_{\text{с. кр}}}{\sqrt{l^2 + d^2}}.$$

2. По формуле (12) рассчитайте значение (e/m) для каждого анодного напряжения и определите среднее значение. Сравните результаты с табличным значением (e/m) для электрона.

3. Из уравнения (13) следует, что $8U_a = (e/m)(r_a B_{\text{кр}})^2$, поэтому аппроксимацией зависимости $8U_a$ от $(r_a B_{\text{кр}})^2$ является прямая линия. Проведите через экспериментальные точки на графике зависимости $8U_a$ от $(r_a B_{\text{кр}})^2$ аппроксимирующую прямую.

4. Найдите значение удельного заряда электрона (e/m) как углового коэффициент аппроксимирующей прямой на графике зависимости $8U$ от $(rB)^2$.

5. Рассчитайте погрешность определения (e/m) , используя метод графической обработки результатов по следующей формуле:

$$\delta(e/m) = \sqrt{\left[\frac{\Delta(8U_a)}{8U_a} \right]^2 + \frac{\Delta(rB)^2}{(rB)^2}}.$$

Запишите окончательный результат в стандартном виде.

5. Контрольные вопросы

1. Опишите методику определения удельного заряда электрона, используемую в данной лабораторной установке.

2. Нарисуйте траекторию электрона в вакуумном диоде при $B < B_{\text{кр}}$ и $B > B_{\text{кр}}$.

3. Укажите силы, действующие на электрон во взаимноперпендикулярных электрическом и магнитном полях.

4. Можно ли данную установку использовать для измерения магнитной индукции в соленоиде, если считать удельный заряд электрона известным?

5. Как изменятся траектория электрона при изменении направления тока в соленоиде?

6. Укажите причины отсутствия резкого спада анодного тока в области критического значения индукции магнитного поля.

7. Почему после спада значение силы тока диода не становится равным нулю?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 27 (2)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИУСА ТРАЕКТОРИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ КАТУШЕК ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Цель работы — изучение движения заряженных частиц в магнитном поле, определение удельного заряда электрона.

Теоретические основы работы

Сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле с индукцией \vec{B} и в электрическом поле с напряженностью \vec{E} (сила Лоренца), определяется как:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}],$$

где q — заряд, \vec{v} — скорость частицы.

На заряженную частицу, движущуюся только в магнитном поле со скоростью \vec{v} , действует сила:

$$\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (1)$$

Эта сила является магнитной составляющей силы Лоренца. Она перпендикулярна вектору \vec{v} и поэтому не совершает работы, а лишь искривляет траекторию движения частицы.

Рассмотрим движение электрона в однородном магнитном поле с вектором магнитной индукции, направленным перпендикулярно к вектору скорости движения электрона. В таком случае электрон равномерно движется по окружности, плоскость которой перпендикулярна вектору \vec{B} . Направление действия силы Лоренца показано на рис. 1. Уравнение движения частицы (в проекции на ось, направленную к центру окружности радиусом r) имеет вид:

$$ma_n = F, \quad (2)$$

где m — масса электрона; $a_n = \frac{v^2}{r}$ — нормальное ускорение электрона. С учетом (1):

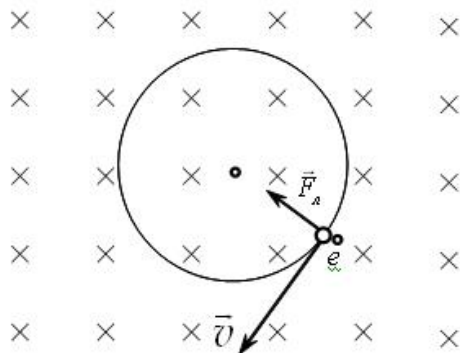


Рис. 1. Движение электрона в однородном магнитном поле

$$m \frac{v^2}{r} = e v B, \quad (3)$$

где m — масса электрона; e — модуль заряда электрона; r — радиус окружности.

Скорость электрона можно получить, пользуясь теоремой об изменении кинетической энергии. Для электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U :

$$m \frac{v^2}{2} = eU, \quad (4)$$

откуда

$$v = \sqrt{2 \frac{e}{m} U}. \quad (5)$$

После подстановки выражения для скорости электрона (5) в уравнение (3) получим:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{(rB)^2}. \quad (6)$$

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 2) состоит из электровакуумного прибора 1, катушек Гельмгольца 2, источника питания 3 и амперметра 4. В электровакуумном приборе в сферической колбе

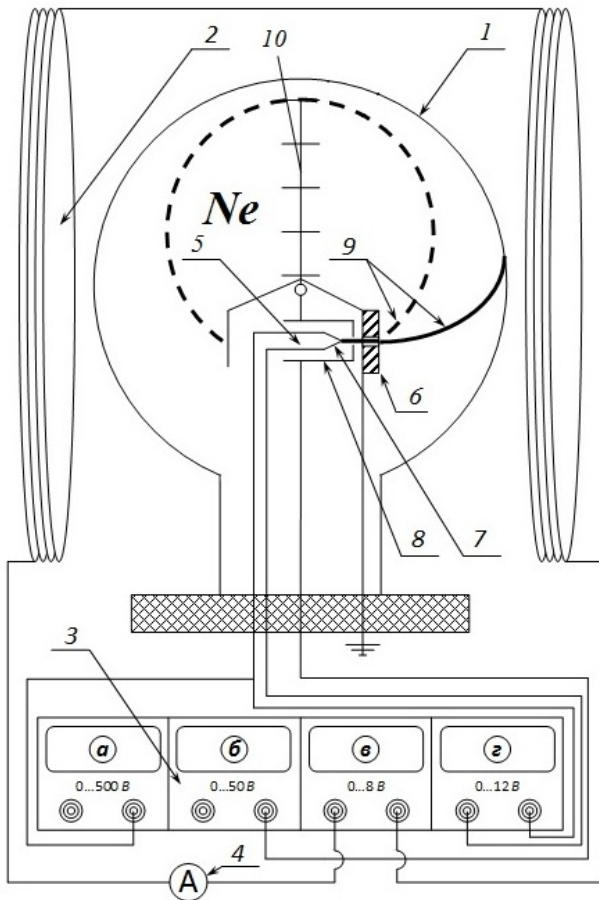


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — сферическая колба электровакуумного прибора; 2 — катушки Гельмгольца; 3 — источник питания; 4 — амперметр; 5 — электронная пушка; 6 — анод, 7 — катод, 8 — фокусирующий электрод; 9 — тонкий пучок электронов; 10 — стержни с калибровочными метками

размещена электронная пушка 5. Источником электронов является катод 7, представляющий собой отрезок проволоки из тугоплавкого металла, нагреваемый электрическим током. Вследствие нагрева катода возникает явление термоэлектронной эмиссии: часть свободных электронов металла, обладая кинетической энергией теплового дви-

жения, достаточной для совершения работы выхода из металла, покидает его поверхность. Электроны попадают в ускоряющее электрическое поле, создаваемое катодом 7 и заземленным анодом 6, а с помощью фокусирующего электрода 8 формируется тонкий пучок 9. В отсутствие магнитного поля электроны движутся прямолинейно, попадая на стенку колбы. Для визуализации пучка электронов в колбе электровакуумного прибора 1 имеется небольшое количество инертного газа (неон), излучающего свет в результате столкновения электронов с молекулами газа.

Магнитное поле создается парой последовательно соединенных катушек Гельмгольца 2. Они представляют собой две соосно расположенные одинаковые катушки, расстояние между центрами которых приблизительно равно их среднему радиусу, а толщина каждой катушки значительно меньше её радиуса.

Индукция магнитного поля перпендикулярна плоскости траектории 9 электронов. Для наглядности схемы подключения к источнику питания, катушки Гельмгольца 2 изображены с разворотом вокруг вертикальной оси на 90° . В центре системы катушек Гельмгольца имеется зона практически однородного магнитного поля, в которой и размещается колба электровакуумного прибора. Индукция магнитного поля пропорциональна силе тока в катушках:

$$B = kI, \quad (7)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

При включении магнитного поля траектория движения электронов имеет вид кольца, наблюдаемого визуально. Для измерения диаметра этого кольца в колбе электровакуумного прибора 1 расположены стержни 10 с калибровочными метками (расстояние между метками 20 мм, верхняя метка соответствует диаметру окружности 100 мм).

В лабораторной работе используется многоканальный источник питания (рис. 3). На передней панели источника расположены четыре стрелочных вольтметра и четыре ручки потенциометров для регулирования напряжения. Первой ручкой (слева) регулируется величина ускоряющей разности потенциалов электрического поля, измеряемой вольтметром со шкалой 0...500 В. Второй ручкой (слева) регулируется фокусировка пучка электронов (шкала вольтметра 0...50 В). Третьей ручкой (слева) регулируется напряжение в цепи катушек Гельмгольца (шкала вольтметра 0...8 В). И четвертой ручкой регулируется напряжение накала катода, т.е. интенсивность электронного пучка (шкала вольтметра 0...12 В).

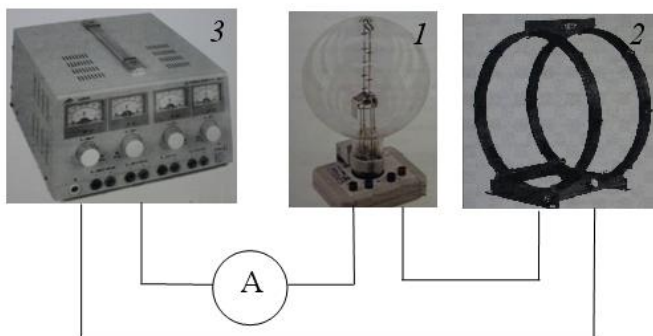


Рис. 3. Фотографии блоков экспериментальной установки и схема их соединения:

1 — электровакуумный прибор; *2* — катушки Гельмгольца; *3* — источник питания; *A* — амперметр

3. Порядок выполнения работы

1. Заполните табл. 1.
2. Убедитесь, что электровакуумный прибор *1* (рис. 2) расположен симметрично между катушками Гельмгольца. Проверьте правильность соединения проводов согласно рис. 2.
3. Включите электропитание установки и измерительных приборов.
4. Вращая ручку «*г*» (см. рис. 2), установите значение напряжения накала катода равное 7,5 В.
Примечание. Для нагрева катода и появления пучка электронов необходимо время не менее 30—40 с.
5. Вращая ручку «*а*», установите значение анодного напряжения равное 300 В.
Примечание. Ручка «*а*» многооборотная.
6. Отрегулируйте фокусировку и яркость электронного пучка, изменяя напряжение накала (ручка «*г*», шкала 0...12 В) и напряжение фокусировки (ручка «*б*») так, чтобы электронный луч был тонким и хорошо видимым на темном фоне.
7. Вращая ручку «*в*», увеличьте напряжение на катушках Гельмгольца (шкала 0...8 В) так, чтобы траектория электронов начала изгибаться вверх. Продолжайте увеличивать напряжение, пока траектория электронного луча не сформируется в виде кольца.

8. Установите значение напряжения на катушках Гельмгольца такое, чтобы диаметр окружности совпадал с соответствующим маркером в электровакуумном приборе (вертикальный стержень с горизонтальными маркерами) и был равен 100 мм (первая метка сверху).

9. Измерьте амперметром значение силы тока в катушках и запишите его в табл. 2.

10. Повторите пункты 8—9 для диаметров колец луча 80 мм (вторая метка сверху) и 60 мм (третья метка сверху).

11. Повторите пункты 8—10 для значения ускоряющего напряжения 200 В и 250 В (шкала 0...500 В).

Таблица 1

Спецификация измерительных приборов

| Название прибора и его тип | Пределы измерения | Инструментальная погрешность |
|----------------------------|-------------------|------------------------------|
| | | |

Данные установки: $k = 0,756 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м}^2$.

Таблица 2

Результаты измерений

| № | $U = 200 \text{ В}$ | | $U = 300 \text{ В}$ | | $U = 400 \text{ В}$ | |
|---|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| | $d, \text{ мм}$ | $I, \text{ А}$ | $d, \text{ мм}$ | $I, \text{ А}$ | $d, \text{ мм}$ | $I, \text{ А}$ |
| 1 | 100 | | 100 | | 100 | |
| 2 | 80 | | 80 | | 80 | |
| 3 | 60 | | 60 | | 60 | |

4. Обработка результатов измерений

1. Для каждого значения силы тока рассчитайте значение магнитной индукции B по формуле (7). Результаты запишите в табл. 3.

2. Рассчитайте значения $2U$ и $(rB)^2$, где r — радиус траектории электронов. Результаты занесите в табл. 3.

Таблица 3

Результаты обработки измерений

| $I, \text{ А}$ | $B, \text{ Тл}$ | $2U, \text{ В}$ | $r, \text{ мм}$ | $(rB)^2, (\text{м} \cdot \text{Тл})^2$ |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|
| | | | | |

3. Из уравнения (6) следует, что $2U = (e/m)(rB)^2$, поэтому аппроксимацией зависимости $2U$ от $(rB)^2$ является прямая линия. Проведите через экспериментальные точки на графике зависимости $2U$ от $(rB)^2$ аппроксимирующую прямую.

4. Найдите значение удельного заряда электрона (e/m) как угловой коэффициент аппроксимирующей прямой на графике зависимости $2U$ от $(rB)^2$.

5. Рассчитайте погрешность определения (e/m), используя метод графической обработки результатов по следующей формуле:

$$\delta(e/m) = \sqrt{\left[\frac{\Delta(2U)}{2U} \right]^2 + \frac{\Delta(rB)^2}{(rB)^2}}.$$

Запишите окончательный результат в стандартном виде, сравните его с имеющимся в литературе табличным значением.

Объясните причины расхождения.

5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение силы Лоренца.
2. Опишите методику определения удельного заряда электрона, используемую в данной лабораторной установке.
3. Укажите направление силы, действующий на движущийся электрон и протон в магнитном поле.
4. Каким образом в электровакуумном приборе обеспечивается визуализация траектории движения электронов?
5. Как изменится траектория электрона при изменении направления тока в катушках Гельмгольца?
6. Почему для создания магнитного поля используется не одна, а две расположенные соосно катушки?
7. Нарисуйте качественную зависимость распределения магнитной индукции по оси катушек Гельмгольца.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 28

ИЗУЧЕНИЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА

Цель работы — изучение основной кривой намагничивания ферромагнетика. Исследование зависимости магнитной индукции, намагниченности и относительной магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля.

1. Теоретические основы работы

Объяснение магнитных свойств веществ в рамках классической физики невозможно и требует привлечения квантовых представлений, однако качественное понимание вопроса могут дать простые и наглядные модели.

Согласно планетарной модели атома, электрон движется вокруг ядра по стационарной орбите. Вследствие этого, движение электрона по круговой орбите можно представить как кольцевой микроток с некоторым магнитным моментом \vec{p}_m . Если все направления \vec{p}_m атомов вещества являются равновероятными, то суммарный магнитный момент вещества равен нулю, а вещество является размагниченным. Процесс, при котором происходит ориентирование магнитных моментов микротоков, а вещество приобретает отличный от нуля средний магнитный момент, называется намагничиванием. Намагниченное вещество создает магнитное поле \vec{B}' , которое накладывается на внешнее поле со значением индукции \vec{B}_0 (поле, созданное макроскопическими токами). Оба поля в сумме создают результирующее поле

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'.$$

Магнитные свойства вещества характеризует вектор намагниченности. Эту величину называют намагниченностью и обозначают \vec{J} . Намагниченность в данной точке определяется следующим выражением:

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

где ΔV — физически бесконечно малый объем, взятый в окрестности рассматриваемой точки; \vec{p}_Σ — магнитный момент отдельной моле-

кулы. Суммирование производится по всем молекулам, заключенным в объеме ΔV .

Ферромагнетики, изучению которых посвящена данная лабораторная работа, обладают спонтанной намагниченностью, то есть они могут быть намагниченными даже при отсутствии внешнего магнитного поля ($B_0 = 0$).

Согласно гипотезе Ампера, в молекулах вещества циркулируют молекулярные токи (микротоки). В этом случае закон полного тока принимает следующий вид:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0(I + I_{\text{мол}}), \quad (2)$$

где I — алгебраическая сумма макроскопических токов, сцепленных с контуром L ; $I_{\text{мол}}$ — молекулярный ток, сцепленный с тем же контуром.

Циркуляция вектора \vec{J} по замкнутому контуру L определяется алгебраической суммой сцепленных с ним молекулярных токов:

$$\oint_L \vec{J} d\vec{l} = I_{\text{мол}}. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2) легко увидеть, что существует некий вектор, циркуляция которого по замкнутому контуру определяется только макротоками проводимости, которые, как правило, изначально известны. Этот вектор называется напряженностью магнитного поля и определяется следующим образом:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}, \quad (4)$$

Отсюда магнитная индукция в магнетике:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}). \quad (5)$$

Для ферромагнетика характерна сложная нелинейная зависимость намагниченности от величины напряженности внешнего магнитного поля. Формально связь этих величин записывается в виде:

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (6)$$

где χ — магнитная восприимчивость вещества, которая для ферромагнетика не является константой, а зависит от напряженности магнитного поля.

Подставив (6) в (5), получим зависимость между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (7)$$

где $\mu = 1 + \chi$ — относительная магнитная проницаемость.

В классических работах А.Г. Столетова была установлена сложная нелинейная зависимость между магнитной индукцией \vec{B} и напряженностью \vec{H} . По значениям \vec{B} и \vec{H} можно определить намагниченность магнетика:

$$\vec{J} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H}.$$

Зависимость $J(H)$, которую предстоит установить в эксперименте, качественно представлена на рис. 1. Вид этой зависимости связан с так называемой доменной структурой ферромагнетика. Домен — это область, в которой спины электронов соседних атомов сонаправлены, в результате чего магнитный момент домена отличен от нуля. Линейные размеры доменов порядка $10^{-2} \dots 10^{-1}$ мм.

В случае, когда ферромагнетик размагничен, векторная сумма магнитных моментов всех доменов равна нулю. Увеличение напряженности внешнего поля H , в котором находится ферромагнетик, приводит к его намагничиванию. Это намагничивание ферромагнетика происходит за счет двух процессов: смещения границ доменов и вращения их магнитных моментов. Процесс смещения границ между доменами приводит к росту размеров тех доменов, которые самопроизвольно намагничены в направлениях близких к направлению вектора H (область I на рис. 1). После того как магнитные моменты всех доменов будут ориентированы одинаково — вдоль направления напряженности внешнего поля, — наступает насыщение ферромагнетика (область II на рис. 1), при этом намагниченность J достигает максимального значения и перестает зависеть от напряженности внешнего поля.

Важной особенностью ферромагнетиков является магнитный гистерезис, т. е. зависимость намагниченности от предшествующего состояния. На рис. 2 кривая (0 – 1) называется основной кривой намагничивания. Рассмотрим процесс намагничивания первоначально размагниченного ферромагнетика, поместив его внутрь намагничивающей катушки. За счет увеличения силы тока в катушке увеличивается напряженность магнитного поля внутри ферромагнетика до зна-

чения H_1 , при этом значение магнитной индукции внутри ферромагнетика становится равным B_1 (точка 1 на рис. 2). Если теперь уменьшать напряженность поля катушки, то процесс размагничивания идет не по кривой (1 – 0), а по кривой (1 – 2). При этом при $H = 0$ магнитная индукция в магнетике не равна нулю (точка 2 на рис. 2). В этом состоянии ферромагнетик является постоянным магнитом. Для полного размагничивания необходимо изменить направление тока в намагничивающей катушке на обратное. Процесс размагничивания будет происходить по кривой (2 – 3), перемагничивания — по кривой (3 – 4). При последующем изменении направления тока в катушке намагничивание магнетика $B(H)$ происходит по кривой (4 – 5 – 1). При циклическом перемагничивании магнетика изменение индукции B в зависимости от напряженности H будет происходить по кривой (1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 1).

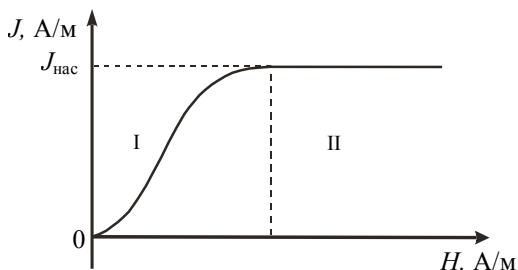


Рис. 1. Зависимость намагниченности ферромагнетика от напряженности магнитного поля

Предположим теперь, что при дальнейшем росте напряженности внешнего поля в точке $1'$ наступило насыщение ферромагнетика. В этом случае петля ($1' - 2' - 3' - 4' - 5' - 1'$) называется предельной. Петли гистерезиса, лежащие внутри этой кривой, называются частными циклами. Предельная петля гистерезиса характеризуется значением остаточной намагниченности ферромагнетика $B_{ост}$ (магнитная индукция в точке $2'$) и коэрцитивной силой H_c (напряженность магнитного поля в точке $3'$).

Как видно из (7), магнитная проницаемость μ определяется как
$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$$
. Анализируя вид основной кривой намагничивания, легко понять, что зависимость $\mu(H)$ имеет максимум (см. рис. 3). Это имеет

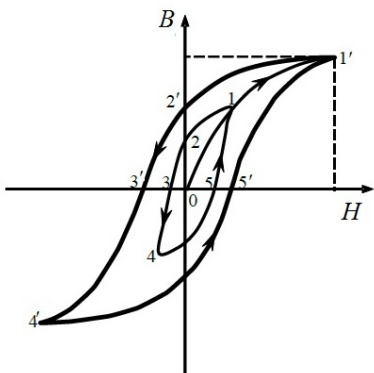


Рис. 2. Петля магнитного гистерезиса

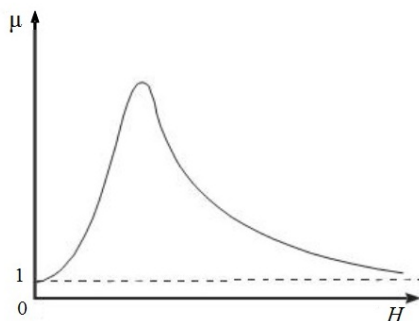


Рис. 3. Зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля

место потому, что вначале, с увеличением напряженности магнитного поля, происходит интенсивный рост доменов с определенным направлением намагниченности и μ резко возрастает, достигая максимального значения (несколько раньше, чем наступает насыщение ферромагнетика). После этого μ начинает убывать, стремясь к единице при насыщении ферромагнетика.

2. Описание экспериментальной установки

Для исследования процесса намагничивания ферромагнетика используется установка, схема которой приведена на рис. 4. Суть эксперимента заключается в независимом определении напряженности магнитного поля в ферромагнетике с помощью закона полного тока и определении магнитной индукции в ферромагнетике на основе использования закона электромагнитной индукции.

Исследуемый образец ферромагнетика представляет собой тороид с площадью поперечного сечения S и радиусом осевой линии r . На образец намотана первичная обмотка, создающая магнитное поле в ферромагнетике и содержащая N_1 витков, и вторичная (измерительная) обмотка, содержащая N_2 витков. Напряжение на первичную обмотку подается с выхода низкочастотного генератора Γ через резистор R_1 .

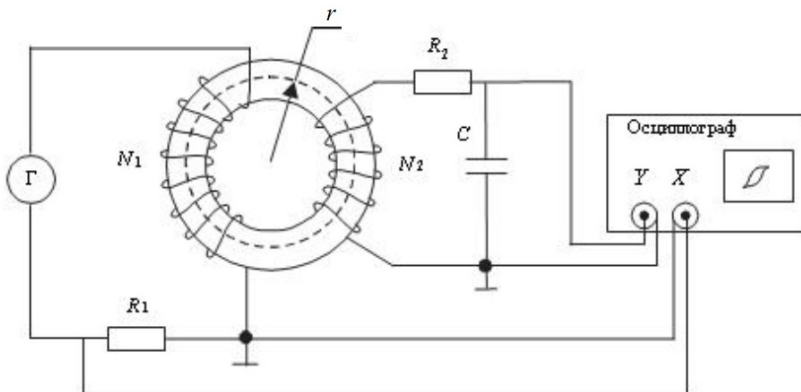


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Напряженность магнитного поля в образце может быть определена из закона полного тока: $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_i I_i^{\text{макро}}$. Выберем контур L , совпадающий с осевой линией тороида. Тогда сумма токов, сцепленных с контуром $\sum_i I_i^{\text{макро}} = N_1 I_1$, а циркуляция вектора \vec{H} определится как $\oint_L H dl = H \oint_L dl = 2\pi r H(r)$. Таким образом,

$$H = \frac{I_1 N_1}{2\pi r}. \quad (8)$$

Все линии магнитной индукции поля, созданного первичной обмоткой, располагаются внутри ферромагнетика. Вследствие этого, магнитный поток, пронизывающий виток вторичной и первичной обмоток, одинаков. Поскольку первичная обмотка подключена к генератору переменного напряжения, этот поток является переменным, поэтому, в силу закона Фарадея—Максвелла, во вторичной обмотке возникает ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_{i,2} = -\frac{d\Psi_2}{dt}, \quad (9)$$

где $\Psi_2 = N_2 SB$ — потокосцепление измерительной обмотки, в предположении о постоянстве магнитной индукции по сечению тороида.

Подставляя значение потокосцепления в (9), выражение для магнитной индукции принимает вид:

$$B = -\frac{1}{SN_2} \int \mathcal{E}_{i,2} dt. \quad (10)$$

Таким образом, для определения B нужно проинтегрировать сигнал, наведенный в измерительной обмотке изменяющимся магнитным полем. Для интегрирования сигнала применяется цепочка, состоящая из резистора R_2 и конденсатора C . «RC-цепочка» выполняет свое назначение, если $\mathcal{E}_{i,2} \gg U_c$. При этом сила тока в измерительной обмотке $I_2 \approx \mathcal{E}_{i,2} / R_2$, а для напряжения на конденсаторе можно записать:

$$U_c = \frac{q}{C} = -\frac{1}{C} \int I_2 dt = -\frac{1}{R_2 C} \int \mathcal{E}_{i,2} dt. \quad (11)$$

Из (10) с учетом (11) получим выражение для магнитной индукции:

$$B = \frac{U_c R_2 C}{SN_2}. \quad (12)$$

Таким образом, для расчета напряженности магнитного поля необходимо непосредственно измерить напряжение на резисторе R_1 (пропорциональное силе тока I_1 и, следовательно, напряженности магнитного поля в образце). Для расчета магнитной индукции необходимо измерить напряжение на конденсаторе U_c . Для измерений электрических величин в данной работе используется двухканальный осциллограф, на один вход которого подается напряжение U_c , а на другой — U_{R_1} .

3. Порядок выполнения работы

1. Заполните табл. 1.
2. Проверьте соответствие соединения приборов принципиальной схеме установки: подключение первичной обмотки к генератору, подключение конденсатора RC-цепи к вертикальной развертке осциллографа, а резистора R_1 — к горизонтальной развертке осциллографа.
3. Включите генератор, осциллограф и измерительные приборы.

4. Установите на генераторе частоту и форму сигнала, указанную на лабораторном модуле.

5. Установите минимально возможное выходное напряжение генератора, при этом на экране осциллографа будете наблюдать светящуюся точку. Настройте осциллограф таким образом, чтобы точка находилась в центре экрана.

6. Плавно увеличивая амплитуду выходного напряжения генератора, получите на экране осциллографа устойчивое изображение петли гистерезиса.

7. Отметьте на экране осциллографа положение крайней верхней правой точки петли гистерезиса в координатах $X \rightarrow U_R$ и $Y \rightarrow U_C$ (примером этой точки может служить точка 1 на рис. 2). Значения U_R и U_C запишите в табл. 2.

8. Повторите пункты 6—7 для 10—15 значений выходного напряжения генератора.

Таблица 1

Спецификация измерительных приборов

| Название прибора и его тип | Пределы измерения | Инструментальная погрешность |
|----------------------------|-------------------|------------------------------|
| | | |

Данные установки и результаты измерений:

- Площадь поперечного сечения тороида..... $S =$
 Количество витков первичной обмотки..... $N_1 =$
 Количество витков вторичной обмотки..... $N_2 =$
 Емкость конденсатора..... $C =$
 Сопротивление резистора..... $R_1 =$
 Сопротивление резистора..... $R_2 =$

Таблица 2

Зависимость магнитной индукции, намагниченности и магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

| № | $U_R, В$ | $U_C, В$ | $I_1, А$ | $H, А/м$ | $B, Тл$ | $J, А/м$ | μ |
|---|----------|----------|----------|----------|---------|----------|-------|
| | | | | | | | |

4. Обработка результатов измерений

По результатам измерений (табл. 2) определите силу тока в первичной обмотке по формуле $I_1 = U_R / R_1$.

По формулам (8), (12) вычислите значения напряженности магнитного поля H и магнитной индукции B .

Постройте график зависимости $B(H)$.

По формулам (4) и (7) вычислите намагниченность J и магнитную проницаемость μ . Результаты запишите в ту же таблицу.

Постройте графики $J(H)$ и $\mu(H)$.

Замечание. Графики $B(H)$, $J(H)$ и $\mu(H)$ должны быть нарисованы на одной странице друг под другом так, чтобы начало отсчета H у всех графиков совпадали.

Рассчитайте погрешность вычисления магнитной индукции (любого значения по указанию преподавателя) по формуле

$$\Delta B = B \sqrt{(\delta U_c)^2 + (\delta R_2)^2 + (\delta C)^2 + (\delta N_2)^2}$$
. Обратите внимание, что способ расчета погрешности U_c зависит от того, использовали Вы для измерений электронный или цифровой осциллограф.

Рассчитайте погрешность вычисления напряженности магнитного поля (любого значения по указанию преподавателя) по формуле

$$\Delta H = H \sqrt{(\delta I_1)^2 + (\delta r)^2}$$
. Обратите внимание, что I_1 также является косвенным измерением.

Рассчитайте погрешность вычисления намагниченности J напряженности магнитного поля (любого значения по указанию преподавателя) по формуле

$$\Delta J = \sqrt{(\Delta B)^2 / \mu_0 + (\Delta H)^2}$$
.

Рассчитайте погрешность вычисления относительной магнитной проницаемости μ (любого значения по указанию преподавателя) по

формуле
$$\Delta \mu = \mu \sqrt{(\delta B)^2 + (\delta H)^2}$$
.

Запишите полученные результаты в стандартной форме.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое ферромагнетик?
2. Что означает термин «намагнитить вещество»?
3. В чем заключается гипотеза Ампера о существовании атомных микротоков?
4. Дайте определение понятию намагниченность.
5. Что такое напряженность магнитного поля?

6. Каковы особенности применения закона полного тока в ферромагнетиках?

7. Как по графику зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля найти значение намагниченности при насыщении ферромагнетика?

8. Каков характер зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля в ферромагнетике? Что такое магнитный гистерезис?

9. Каков характер зависимости намагниченности от напряженности магнитного поля в ферромагнетике? Что означает насыщение ферромагнетика?

10. Каков характер зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля в ферромагнетиках? Почему данная зависимость имеет максимум?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 29

ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы — изучение затухающих колебаний; определение основных характеристик колебательного контура.

1. Теоретические основы работы

Колебательным контуром называется электрическая цепь, содержащая катушку с индуктивностью L , конденсатор с емкостью C , и резистор с сопротивлением R (рис. 1). Если зарядить конденсатор от батареи с ЭДС \mathcal{E} до напряжения U_m , а затем с помощью переключателя K замкнуть на колебательный контур, то конденсатор начнет разряжаться, и в контуре возникнут электромагнитные колебания.

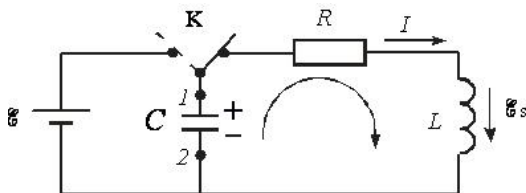


Рис. 1. Последовательный колебательный контур

Согласно закону Ома для участка цепи 1 – R – L – 2

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_c, \quad (1)$$

где $I = -\frac{dq}{dt}$ (конденсатор разряжается); \mathcal{E}_c — ЭДС самоиндукции.

Разность потенциалов на конденсаторе определяется по формуле:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U_c = \frac{q}{C};$$

а для ЭДС самоиндукции справедливо следующее выражение:

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt} = -L \frac{d^2q}{dt^2}.$$

После подстановки $\varphi_1 - \varphi_2$, I и \mathcal{E}_s в уравнение (1) имеем:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0.$$

Последнее уравнение можно записать в следующем виде:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = 0. \quad (2)$$

Приняв во внимание, что $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ — циклическая частота собственных колебаний, а величина $\beta = \frac{R}{2L}$ — коэффициент затухания, для дифференциального уравнения (2) можно записать:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой дифференциальное уравнение затухающих электрических колебаний. Уравнение его решения:

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) \text{ или } q = q_m \cos(\omega t + \varphi),$$

где $q_m = q_0 e^{-\beta t}$ — амплитуда колебаний заряда; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ — циклическая частота затухающих колебаний; φ — начальная фаза колебаний.

Учитывая, что $U_c = q/C$, для напряжения на конденсаторе получаем:

$$U_c = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

или

$$U = U_m \cos(\omega t + \varphi),$$

где $U_m = U_0 e^{-\beta t}$ — амплитуда колебаний напряжения на конденсаторе; $U_0 = q / C$.

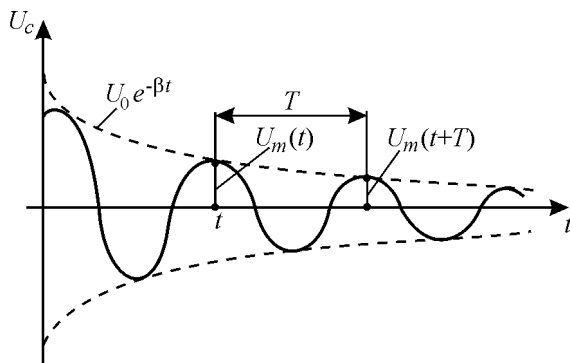


Рис. 2. Зависимость напряжения на конденсаторе от времени

Коэффициент затухания β характеризует скорость убывания амплитуды колебаний (за время $\tau = \frac{1}{\beta}$ амплитуда колебаний уменьшается в e раз). На рис. 2 показана зависимость напряжения на конденсаторе от времени.

Период колебаний определяется по формуле

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \quad (5)$$

Логарифмическим декрементом колебаний δ называется логарифм отношения амплитуд напряжения, разделенных одним периодом колебаний:

$$\delta = \ln \frac{U_m(t)}{U_m(t+T)}. \quad (6)$$

Поскольку $U_m(t) = U_0 e^{-\beta t}$, а $U_m(t+T) = U_0 e^{-\beta(t+T)}$, то логарифмический декремент описывается уравнением

$$\delta = \beta T. \quad (7)$$

2. Описание лабораторной установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 3.

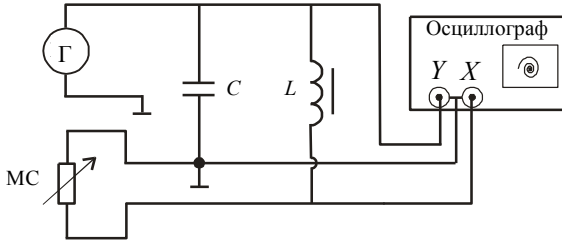


Рис. 3. Принципиальная схема лабораторной установки

Колебательный контур содержит конденсатор электроемкостью C , катушку индуктивностью L и магазин сопротивлений $МС$. Периодическая зарядка конденсатора осуществляется прямоугольными импульсами от генератора импульсов (Γ). Может также использоваться генератор синусоидальных сигналов с преобразователем импульсов. Напряжение U_c с конденсатора подается на вход вертикального усилителя осциллографа, что позволяет наблюдать затухающие колебания напряжения на экране осциллографа.

Изменяя сопротивление R_M магазина сопротивлений и выполнив соответствующие измерения на экране осциллографа, можно определить зависимость периода T затухающих колебаний и логарифмического декремента δ от электрического сопротивления контура.

Логарифмический декремент зависит от полного сопротивления контура:

$$\delta = \beta T = \frac{R}{2L} T, \quad (8)$$

где период T определяется по уравнению (5).

В условиях эксперимента $\beta^2 \ll \omega_0^2$, поэтому период колебаний T можно считать постоянным и равным

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (9)$$

Учитывая, что полное сопротивление контура $R = R_M + R_K$, где R_M — сопротивление магазина $МС$, R_K — сопротивление катушки, из (8) получим

$$\delta = \frac{T}{2L} (R_M + R_K).$$

Зависимость логарифмического декремента от сопротивления ма­газина является линейной и описывается уравнением прямой

$$\delta = k R_M + b,$$

где $k = \frac{T}{2L}$; $b = \frac{T R_K}{2L}$.

График зависимости $\delta = f(R_M)$ приведен на рис. 4. По графику можно определить сопротивление катушки, аппроксимируя опытную зависимость $\delta = f(R_M)$ до пересечения с осью абсцисс, а индуктив­ность катушки рассчитать по тангенсу угла наклона прямой

$$L = \frac{T}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (10)$$

где $[\operatorname{tg} \alpha]$ с учетом рис. 4 и (8) имеет размерность $[T]/[L] = \text{с/Гн}$.

Емкость конденсатора C можно определить по формуле (9), зная период колебаний T и индуктивность L катушки.

В ряде случаев удобно изучать колебательный процесс в системе координат (U_C, I) , называемой фазовой плоскостью. Кривая зависи­мости напряжения на конденсаторе от силы тока в контуре на фазовой плоскости называется фазовой кривой.

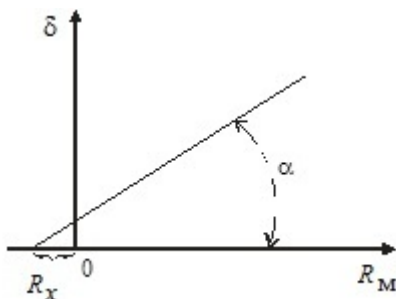


Рис. 4. Зависимость логарифмического декремента от электрического сопротивления

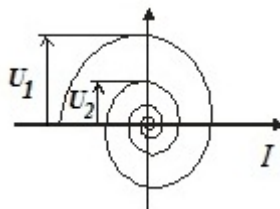


Рис. 5. Зависимость напряжения на конденсаторе от силы тока в колебательном контуре

При затухающих колебаниях амплитуды напряжения на конденсаторе и силы тока в контуре монотонно убывают, и фазовая кривая имеет вид, приведенный на рис. 5.

Фазовая кривая наблюдается на экране осциллографа при подаче на вертикальные отклоняющие пластины напряжения с конденсатора, а на горизонтальные пластины — напряжения с магазина сопротивлений. По фазовой кривой можно определить логарифмический декремент.

3. Порядок выполнения работы

1. Заполните табл. 1.
2. Проверьте правильность соединений электрической цепи согласно принципиальной схеме (рис. 3).
3. Включите электропитание лабораторного стенда, генератор сигналов низкой частоты и осциллограф.
4. Установите выходное напряжение генератора 2 В (по осциллографу) и частоту 250 Гц.
5. На магазине сопротивлений установите нулевое значение сопротивления $R_M = 0$ Ом или $R_M = 1$ Ом.
6. Получите на осциллографе устойчивое изображение 3–5 периодов затухающих колебаний.
7. Измерьте по горизонтальной шкале экрана осциллографа длительность n периодов колебаний ($\tau_n = n T$).
8. Измерьте по вертикальной шкале экрана осциллографа амплитуды колебаний напряжения на конденсаторе $U_m(t)$ и $U_m(t + n T)$, разделенных n периодами. Результаты измерений запишите в табл. 2.
9. Проведите измерения по пункту 8 для сопротивлений R_M магазина от начального значения до 500 Ом с шагом 100 Ом и запишите результаты измерений в табл. 2.

Таблица 1

Спецификация измерительных приборов

| Название прибора и его тип | Пределы измерения | Инструментальная погрешность |
|----------------------------|-------------------|------------------------------|
| | | |

Зависимость логарифмического декремента от электрического сопротивления

| № | $R_m, \text{ Ом}$ | n | $U_m(t), \text{ В}$ | $U_m(t + nT), \text{ В}$ | δ |
|---|-------------------|-----|---------------------|--------------------------|----------|
| | | | | | |

4. Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте период затухающих колебаний по формуле:

$$T = \frac{\tau_n}{n}.$$

2. Используя данные табл. 2, рассчитайте значения логарифмического декремента по формуле

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{U(t)}{U(t + nT)}.$$

Результаты расчетов запишите в табл. 2.

3. Постройте график зависимости $\delta = f(R)$. Определите по графику электрическое сопротивление катушки R_k . Вычислите значения индуктивности катушки L по формуле (10) и емкости конденсатора C по формуле (9).

4. Определите абсолютные погрешности $\Delta\delta$ и ΔR_k , используя график зависимости $\delta = f(R)$, а абсолютные погрешности ΔT , ΔL , ΔC с помощью формул:

$$\Delta T = \frac{1}{n} \Delta \tau_n; \delta L = \sqrt{\delta_T^2 + \delta_{\text{tg}\alpha}^2}; \delta C = \sqrt{4\delta_T^2 + \delta_L^2}.$$

5. Запишите результаты вычислений в стандартном виде.

5. Контрольные вопросы

1. Что называется колебательным контуром? Объясните, как в нем возникают колебания.

2. Запишите дифференциальное уравнение собственных затухающих электрических колебаний и его решение.

3. Как зависит от времени амплитуда собственных затухающих электрических колебаний?

4. Запишите формулу для частоты свободных затухающих колебаний в колебательном контуре.

5. Что такое коэффициент затухания? Как он характеризует затухание колебаний?

6. Дайте определение логарифмического декремента. Как логарифмический декремент характеризует затухание колебаний?

7. Покажите, что уравнение (10) не нарушает теорию размерности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 30

ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Цель работы — изучение явлений, наблюдаемых в колебательном контуре при возбуждении в нем колебаний переменной ЭДС с частотами, близкими к резонансной, исследование резонансных кривых для силы тока; определение зависимости резонансной частоты от емкости. Расчет индуктивности контура.

1. Теоретические основы работы

Если последовательно с элементами колебательного контура (рис. 1) включить источник ЭДС, значение которой меняется по гармоническому закону $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_m \cos \omega t$, то в контуре возникнут вынужденные колебания.

Согласно закону Ома, сумма падений напряжения на элементах контура равна алгебраической сумме ЭДС в контуре:

$$IR + U_c = \mathcal{E}_m \cos \omega t + \mathcal{E}_s, \quad (1)$$

где IR — падение напряжения на сопротивлении R ; U_c — падение напряжения на конденсаторе; $\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}$ — ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке с индуктивностью L при прохождении в ней переменного тока.

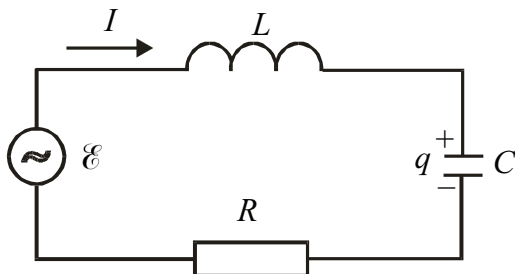


Рис. 1. Последовательный колебательный контур

Уравнение (1) можно записать в виде

$$IR + U_c + L \frac{dI}{dt} = \mathcal{E}_m \cos \omega t. \quad (2)$$

С учетом того, что

$$U_c = \frac{q}{C}; \quad I = \frac{dq}{dt},$$

где q — заряд на конденсаторе, получим:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = \mathcal{E}_m \cos \omega t.$$

Разделив все слагаемые последнего уравнения на L , можно записать

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = \frac{1}{L} \mathcal{E}_m \cos \omega t.$$

Принято обозначать $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ — циклическая частота собственных колебаний; $\beta = \frac{R}{2L}$ — коэффициент затухания.

С учетом принятых обозначений уравнение принимает вид

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{\mathcal{E}_m}{L} \cos \omega t. \quad (3)$$

Общее решение (3) представляет собой сумму общего решения соответствующего однородного уравнения (без правой части) и частного решения неоднородного уравнения.

Решение однородного уравнения содержит экспоненциальный множитель $e^{-\beta t}$, который характеризует затухающие колебания. По истечении некоторого времени этот множитель становится очень малым и колебания в контуре будут установившимися.

Установившиеся колебания в контуре определяются частным решением уравнения (3):

$$q = q_m \cos (\omega t - \psi), \quad (4)$$

где

$$q_m = \frac{E_m}{L\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \quad \operatorname{tg}\psi = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

Подставив ω_0^2 и β , получим

$$q_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\omega\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/C\omega)^2}}, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{R}{1/\omega C - \omega L}. \quad (6)$$

Продифференцировав выражение (4) по времени, найдем силу тока в контуре при установившихся колебаниях:

$$I = -\omega q_m \sin(\omega t - \psi) = I_m \cos(\omega t - \psi + \pi/2),$$

где $I_m = \omega q_m$.

Запишем это выражение в виде

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad (7)$$

где $\varphi = \psi - \pi/2$ есть сдвиг по фазе между силой тока и вынуждающей ЭДС. В соответствии с (6)

$$\operatorname{tg}\varphi = \operatorname{tg}\left(\psi - \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{1}{\operatorname{tg}\psi} = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}. \quad (8)$$

Из этой формулы следует, что ток отстает по фазе от ЭДС ($\varphi > 0$) в том случае, если $\omega L > 1/\omega C$, и опережает ЭДС, если $\omega L < 1/\omega C$.

Зависимость амплитуда силы тока в контуре от частоты имеет вид

$$I_m = \omega q_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/C\omega)^2}}. \quad (9)$$

График зависимости амплитуды установившихся вынужденных колебаний от частоты внешней ЭДС называют резонансной кривой.

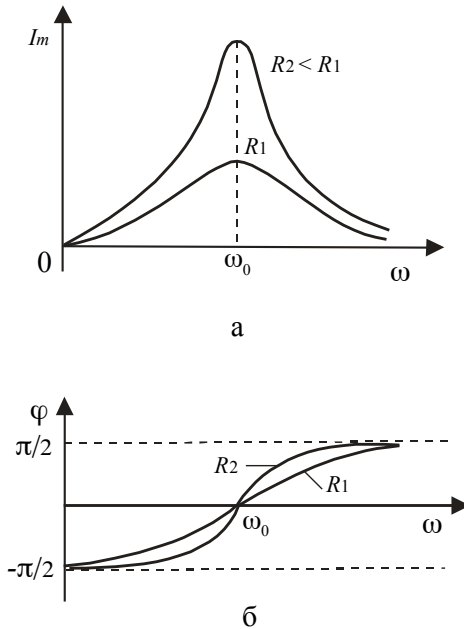


Рис. 2. Зависимость амплитуды силы тока (а) и сдвига фаз (б) от частоты

Из выражений (8), (9) видно, что амплитуда силы тока и сдвиг фаз зависят от частоты ω , вынуждающей ЭДС. Анализ этих соотношений указывает на наличие экстремума функции $I_m = f(\omega)$ при некоторой частоте $\omega = \omega_0$. Эту частоту называют резонансной частотой, причем

$$\omega_{\text{рез}} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (10)$$

На резонансной частоте амплитуда силы тока достигает максимального значения (рис. 2, а), а сдвиг фаз между колебаниями силы тока и вынуждающей ЭДС становится равным нулю (рис. 2, б).

Явление изменения характеристик колебательного контура RLC при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой называется резонансом (резкий рост амплитуды напряжения — резонанс напряжения, резкий рост амплитуды силы тока — резонанс тока).

2. Описание лабораторной установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 3. Генератор сигналов низкой частоты Γ возбуждает колебания в контуре, содержащем катушку индуктивности L , магазин емкостей (МЕ), магазин сопротивлений (МС) и резистор R_1 .

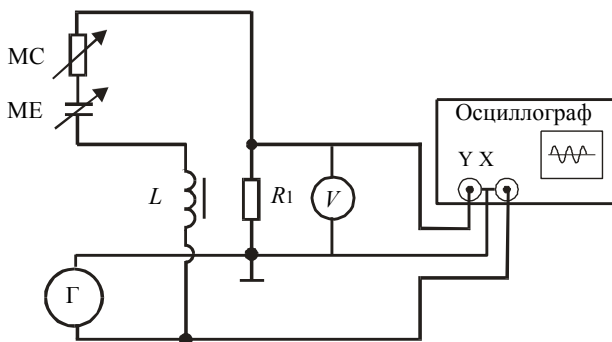


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема

С помощью магазина емкостей и магазина сопротивлений можно изменять параметры колебательного контура (резонансную частоту и коэффициент затухания).

На вход A двухлучевого осциллографа подается напряжение с резистора R , пропорциональное силе тока в контуре; на вход B подается напряжение с генератора сигналов низкой частоты. Одновременно напряжение на резисторе R измеряется вольтметром V .

Таким образом, на экране осциллографа можно одновременно наблюдать колебания силы тока в контуре и вынуждающей ЭДС, а также определять сдвиг фаз между ними.

3. Порядок выполнения работы

1. Заполните табл. 1.
2. Проверьте соответствие соединения электрических цепей принципиальной схеме (рис. 3).

3. На магазине емкостей (МЕ) установите значение электроемкости $C = 3 \cdot 10^{-3}$ мкФ, а на магазине сопротивлений (МС) значение $R = 1$ кОм.

4. Включите лабораторный стенд.
5. Включите генератор сигналов низкой частоты и осциллограф установите на генераторе частоту $\nu = 5$ кГц, а выходное напряжение $U = 2$ В (по осциллографу).
6. Измерьте вольтметром действующее значение напряжения U на резисторе R_1 . Результаты измерений запишите в табл. 2.
7. Повторите измерения по пункту 6 в диапазоне частот от 5 до 15 кГц с шагом 1 кГц. Результаты измерений запишите в табл. 2.
8. На магазине сопротивлений (МС) установите $R = 5$ кОм и произведите измерения по пунктам 6 и 7. Результаты измерений запишите в табл. 2.
9. На магазине емкостей (МЕ) установите значение электроемкости $C = 1 \cdot 10^{-3}$ мкФ. На магазине сопротивлений (МС) установите $R = 1$ Ом. Значение емкости запишите в табл. 3.
10. Изменяя частоту генератора, добейтесь совпадения фаз колебаний вынуждающей ЭДС и силы тока в контуре при наблюдении колебаний на экране осциллографа (или максимума амплитуды колебаний силы тока в контуре). Найденное таким образом значение резонансной частоты ν_0 запишите в табл. 3.
11. Проведите измерения для других значений электроемкостей магазина (МЕ) в диапазоне от $1 \cdot 10^{-3}$ до $10 \cdot 10^{-3}$ мкФ с шагом $1 \cdot 10^{-3}$ мкФ.

Таблица 1

Спецификация измерительных приборов

| Название прибора и его тип | Пределы измерения | Инструментальная погрешность |
|----------------------------|-------------------|------------------------------|
| | | |

Таблица 2

Зависимость амплитуды колебаний силы тока от частоты вынуждающей ЭДС (резонансная кривая)

| № | ν , кГц | $R = 1$ кОм | | $R = 5$ кОм | |
|---|-------------|-------------|---------|-------------|---------|
| | | U , В | I , А | U , В | I , А |
| | | | | | |

Таблица 3

Зависимость резонансной частоты от емкости контура

| № | C , 10^{-3} мкФ | ν_0 , Гц | ω_0 , рад/с |
|---|---------------------|--------------|--------------------|
| | | | |

4. Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте амплитудные значения силы тока в контуре по формуле $I_m = \frac{U_m}{R_1}$ и результат запишите в табл. 2.

2. По данным табл. 2 постройте резонансные кривые $I_m = f(\omega)$ для двух значений сопротивления магазина: $R = 1$ кОм и $R = 5$ кОм.

3. По данным табл. 3 для каждого значения емкости C рассчитайте значение циклической резонансной частоты $\omega_0 = 2\pi\nu_0$. Результаты расчетов запишите в табл. 3.

4. Используя данные табл. 3, постройте график, откладывая значения $1/\omega_0^2$ по оси ординат, а соответствующие им значения C — по оси абсцисс.

5. Аппроксимируйте экспериментальные точки прямой линией $1/\omega_0^2 = f(C)$ и определите значение индуктивности L контура как тангенс угла наклона прямой.

6. Рассчитайте абсолютную погрешность ΔL , используя график зависимости $1/\omega_0^2 = LC$.

7. Результаты расчетов запишите в стандартном виде.

5. Контрольные вопросы

1. Составьте дифференциальное уравнение вынужденных колебаний в контуре.

2. Выведите формулу зависимости амплитуды силы тока в колебательном контуре от частоты внешней ЭДС.

3. Дайте определение понятию «резонанс».

4. Как зависит вид резонансной кривой для силы тока в контуре от его сопротивления?

5. Чем определяется сдвиг фаз между колебаниями тока в контуре и вынуждающей ЭДС, в каком случае этот сдвиг фаз равен нулю?

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Вычисление погрешностей косвенных измерений

Более подробно с методикой определения погрешности прямых и косвенных измерений Вы познакомились в описании лабораторных работ по разделу «Механика и молекулярная физика».

Погрешность косвенно измеряемой величины определяется погрешностями прямо измеряемых величин, а также погрешностями табличных данных и других постоянных, входящих в расчетную формулу.

Пусть косвенно измеряемая величина y есть функция прямо измеренных величин $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$:

$$y = y(x_1, x_2, x_3 \dots x_n). \quad (1)$$

Для вычисления *абсолютной* погрешности косвенного измерения необходимо вывести расчетную формулу по следующему правилу:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 (\Delta x_1)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 (\Delta x_2)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2 (\Delta x_n)^2}, \quad (2)$$

где $\frac{\partial y}{\partial x_1}, \frac{\partial y}{\partial x_2} \dots \frac{\partial y}{\partial x_n}$ — частные производные функции (1) по соответствующим аргументам $x_1, x_2 \dots x_n$; $\Delta x_1, \Delta x_2 \dots \Delta x_n$ — абсолютные погрешности прямо измеренных величин $x_1, x_2 \dots x_n$. Значения производных, входящих в формулу погрешности (2), вычисляют при средних значениях $\bar{x}_1, \bar{x}_2 \dots \bar{x}_n$.

Для вычисления *относительной* погрешности косвенного измерения необходимо вывести расчетную формулу по правилу:

$$\delta y = \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 \left(\frac{\Delta x_1}{y}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 \left(\frac{\Delta x_2}{y}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2 \left(\frac{\Delta x_n}{y}\right)^2}. \quad (3)$$

Пример 1. Пусть значение некоторой косвенно измеряемой величины рассчитывается по формуле $y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n$, где $a_1, a_2 \dots a_n$ — числовые постоянные коэффициенты. В этом случае удобно определить сразу абсолютную погрешность. Применяя правило (2) к

расчетной формуле, получим формулу для вычисления абсолютной погрешности

$$\Delta y = \sqrt{a_1^2 (\Delta x_1)^2 + a_2^2 (\Delta x_2)^2 + \dots + a_n^2 (\Delta x_n)^2}. \quad (4)$$

Пример 2. Пусть $y = x_1^{a_1} \cdot x_2^{a_2} \cdot x_3^{a_3} \cdot \dots \cdot x_n^{a_n}$, где $a_1, a_2 \dots a_n$ — численные постоянные коэффициенты. В этом случае вначале удобно рассчитать относительную погрешность косвенно измеренной величины, а затем абсолютную. Применяя правило (3) к расчетной формуле, получаем формулу для вычисления относительной погрешности

$$\delta y = \frac{\Delta y}{\bar{y}} = \sqrt{a_1^2 (\delta x_1)^2 + a_2^2 (\delta x_2)^2 + \dots + a_n^2 (\delta x_n)^2}, \quad (5)$$

где Δy — абсолютная погрешность косвенно измеренной величины; \bar{y} — значение косвенно измеренной величины, рассчитанной по средним значениям прямо измеренных величин; $\delta x_1, \delta x_2 \dots \delta x_n$ — относительные погрешности прямо измеренных величин. Зная относительную погрешность и среднее значение измеряемой величины, определим абсолютную погрешность

$$\Delta y = \bar{y} \delta_y. \quad (6)$$

Погрешность Δy и среднее значение \bar{y} округляются по правилам округления, изложенным ниже, и окончательный результат представляется в стандартной форме в виде

$$\Delta y = \bar{y} \pm \Delta y. \quad (7)$$

2. Погрешность трансцендентных, иррациональных чисел, физических постоянных, табличных данных, приведенных на экспериментальных установках

Трансцендентные, иррациональные числа, физические постоянные считают точными величинами. В этом случае значение данной величины подставляется в расчетную формулу с числом значащих цифр на единицу больше, чем число значащих цифр в результатах прямых измерений. При этом погрешность округления окажется на порядок меньше погрешности прямого измерения.

Пример 3. Для определения площади круга был измерен его радиус. Результат прямого измерения $r = (1,27 \pm 0,03)$ м. Число значащих

цифр результата измерения равно трем. В этом случае для расчета площади круга $S = \pi r^2$ необходимо подставить число $\pi = 3,142$ (число значащих цифр — четыре). При этом погрешность округления числа π на порядок меньше Δr . В этом случае число π можно считать точным и его погрешностью в расчетной формуле можно пренебречь.

Многие табличные данные, используемые в расчетах, представлены с большой точностью. В этом случае при выборе числа значащих цифр для подстановки в расчетную формулу руководствуются предыдущим правилом.

Если же табличные данные определены с точностью, сопоставимой с результатами прямых измерений, то такие данные считаются приближенными. В этом случае погрешность табличной величины принимается равной половине *единицы последнего разряда*, приведенного в таблице числа. По такому же правилу выбирается погрешность данных, приведенных на экспериментальной установке.

Пример 4. Задана емкость конденсатора $C = 0,24$ мкФ. В этом случае погрешность ΔC равна половине от одной десятой, т.е. $\Delta C = \pm 0,005$ мкФ.

3. Правила записи результата измерений

Результат измерений должен включать указание погрешности, единиц измерения и доверительной вероятности и записывается в виде

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, P = 0,95,$$

где \bar{x} — среднее значение измеряемой величины; Δx — абсолютная погрешность измеряемой величины; P — доверительная вероятность. Эта запись означает, что истинное значение измеряемой величины с вероятностью 0,95 находится в интервале

$$\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x.$$

При записи результата эксперимента абсолютная погрешность и числовое значение результата предварительно округляют. Вначале округляют абсолютную погрешность. Абсолютная погрешность Δx округляется до одной или двух значащих цифр. Погрешность округляется до двух цифр, если первой цифрой погрешности являются 1 или 2 (например, $\pm 0,1243 \approx \pm 0,12$; $\pm 0,2015 \approx \pm 0,20$; $\pm 1,758 \approx \pm 1,8$; $\pm 2,56 \approx \pm 2,6$). Во всех остальных случаях погрешность округляется до одной значащей цифры (например, $\pm 3,14 \approx \pm 3$; $\pm 0,435 \approx \pm 0,4$; \pm

$0,076 \approx \pm 0,08; \pm 512 \approx \pm 500$). Поясним это правило. Само числовое значение погрешности определяется не точно, а с некоторой погрешностью, поэтому нет смысла учитывать все цифры, полученные при ее вычислении. Однако нельзя допускать и слишком грубого округления. Принятые правила округления погрешности изменяют ее значение не более, чем на 20—30 %.

Числовое значение результата измерения \bar{x} должно быть округлено (или уточнено) таким образом, чтобы оно оканчивалось цифрой того же порядка, что и числовое значение погрешности.

Пример 5. При измерении силы тока в результате пяти измерений получили среднее значение

$\bar{I} = 331,22$ А. Расчет погрешности дал значение $\Delta I = 4,6812$ А. Согласно приведенному выше правилу в качестве погрешности измерения принимаем $\Delta I = 5$ А, а среднее значение округляем до единиц $\bar{I} = 331$ А. Окончательный результат запишем в виде

$$I = (331 \pm 5) \text{ А.}$$

Если бы расчет погрешности дал значение $\Delta I = 1,2842$ А, то погрешность необходимо было бы округлить до двух значащих цифр, т.е. $\Delta I = 1,3$ А, а среднее значение до десятых. Тогда окончательный результат имел бы вид

$$I = (331,2 \pm 1,3) \text{ А.}$$

4. Графическое изображение и обработка результатов

Если исследуется функциональная зависимость одной величины от другой, то результаты могут быть представлены в виде графиков. Посмотрев на график, можно сразу оценить вид полученной зависимости, получить о ней качественное представление и отметить наличие максимумов, минимумов, точек перегиба, областей наибольшей и наименьшей скоростей изменения, периодичности и т.п. График позволяет также судить о соответствии экспериментальных данных рассматриваемой теоретической зависимости и облегчает обработку измерений.

При построении графиков соблюдают следующие правила:

1. Графики выполняются преимущественно на миллиметровой бумаге или бумаге со специальными координатными сетками.

2. В качестве осей координат следует применять прямоугольную систему координат (это облегчает использование построенного графика). Общепринято по оси абсцисс откладывать такую величину,

изменения которой являются причиной изменения другой (т.е. по оси абсцисс — аргумент, по оси ординат — функцию). Оси координат следует заканчивать стрелками.

3. Масштаб графика определяется интервалом изменения величин, отложенных по осям; погрешность на графике представляется в выбранном масштабе отрезком достаточной длины. Принятая шкала будет легко читаться, если одна клетка масштабной сетки будет соответствовать удобному числу: 1; 2; 5; 10 и т. д. (но не 3; 7; 13 и т. д.), которое представляет собой единицу отображаемой на графике величины.

4. Масштабы по обеим осям выбираются независимо друг от друга. Следует помнить, что график получается более наглядным, если основная часть кривой имеет наклон, не слишком отличающийся от 45° . В этом случае наиболее удобно анализировать форму кривой. Кривые должны занимать практически всё поле графика (т. е. должно быть соответствие между протяжённостью кривой и размером графика).

5. При исследовании резонансных явлений следует иметь в виду, что в тех областях, где ход кривой монотонный, можно ограничиться небольшим числом измерений (несколькими точками кривой на графике). В областях максимумов, минимумов и точек перегибов следует производить измерения значительно чаще, что увеличит точность построения графика. Если при выборе масштабов для обеих осей на основе интервалов изменения график получается слишком растянутым в каком-либо направлении, то в этом случае следует несколько увеличить масштаб по оси, для которой точность измерений меньше, а затем выбрать масштаб для второй оси таким образом, чтобы график имел удобную форму.



6. Масштаб наносится на осях графика вне его поля в виде равноотстоящих «круглых» чисел, например: 6, 8, 10 и т. д. или 4,74, 4,76, 4,78 и т. д. Не следует расставлять эти числа слишком густо — достаточно нанести их через 2 или даже через 5 см. Около оси координат необходимо написать название величины, которая отложена по данной оси, её обозначение и единицу измерения. При этом множитель, определяющий порядок величины, включается обычно в единицы измерения, например, F , кН или F , 10^{-3} , Н. Если началом отсчёта является нуль, его следует указывать у точки пересечения осей.

7. На графике приводится только та область изменения измеренных величин, которая была исследована на опыте; не нужно стре-

миться к тому, чтобы на графике обязательно поместилось начало координат. Начало обозначают на графике только в том случае, когда это не требует большого увеличения его размеров.

8. Точки должны наноситься на график тщательно и аккуратно, чтобы график получился более точным. На график наносят все полученные в измерениях значения. Если одна точка измерялась несколько раз, то можно нанести среднее арифметическое значение и указать разброс. Если на один и тот же график наносятся различные группы данных (результаты измерения разных величин или одной величины, но полученные в разных условиях и т. п.), то точки, относящиеся к разным группам, должны быть помечены различными символами (кружочки, треугольники, звёздочки и т. п.). Выносные линии на графике не проводятся, необходимо научиться наносить точки на график без их помощи. Выносная линия в виде исключения может быть нанесена, если какую-либо точку хотят особо выделить на графике (например, положение максимума).

9. Поле погрешности по осям X и Y определяется по отклонению экспериментальных точек от аппроксимационной кривой (рис. 1).

Погрешность измерения (доверительный интервал) изображают на графике с помощью вертикальных () и горизонтальных () отрезков, симметрично расположенных относительно соответствующих экспериментальных точек. Нет необходимости указывать погрешность для каждой точки, но если погрешность изменяется вдоль кривой, следует показать это на нескольких точках.

10. Как правило, физические зависимости — это гладкие, плавные линии без резких изломов. Экспериментальные точки вследствие ошибок измерений не ложатся на кривую физической зависимости, а группируются вокруг неё случайным образом. Поэтому не следует соединять соседние экспериментальные точки на графике отрезками прямой и получать таким образом некоторую ломаную линию. Излом на кривой можно рисовать только в том случае, если он не может быть объяснён погрешностью измерений и если при этом на его существование указывает отсутствие систематических ошибок (изломы часто появляются, например, когда сначала работают на одной шкале прибора, а затем переходят на другую). Во всех случаях кривая должна быть проведена так, чтобы она не закрывала экспериментальных точек. Помните, что результат эксперимента — это точки, а кривая — это только толкование вашего результата.

11. Если функция изменяется на несколько порядков при малых изменениях аргумента, то удобно применять системы координат с полулогарифмическим или логарифмическим масштабом. Полулогарифмическая система координат — это прямоугольная система координат, по одной оси которой отложен равномерный масштаб, а по второй — логарифмический (пропорциональный логарифму натуральных чисел). Полулогарифмический масштаб удобен для изображения зависимости типа $y = ae^{\pm kx}$. Логарифмируя зависимость, получим $\ln(y) = \ln(a) \pm kx$. Если наносить величину x по оси равномерной шкалы, а величину y — по оси логарифмической шкалы, то получится прямая линия.

12. Логарифмическая система координат — это прямоугольная система координат, на обеих осях которой отложены логарифмические масштабы. Логарифмические координаты очень удобны для изображения зависимости вида $x^n y^m = \text{const}$. Логарифмируя приводимую зависимость, получим

$$n \lg(x) + m \lg(y) = \lg(C).$$

В логарифмической системе координат такая зависимость будет иметь вид прямой линии.

Необходимо обратить внимание на то, что оптимальная прямая должна делить полосу пополам.

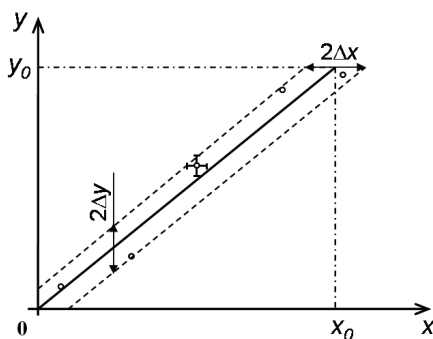


Рис. 1. Пример построения аппроксимирующей зависимости

Угловым коэффициентом k оптимальной прямой можно определить по формуле

$$k = \frac{y_0}{x_0}.$$

Значения x_0 и y_0 должны быть записаны в СИ. Относительную погрешность определения углового коэффициента k можно рассчитать по формуле:

$$\delta k = \sqrt{\left(\frac{\Delta y}{y_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x}{x_0}\right)^2}$$

Абсолютные погрешности Δy и Δx определяются из графика (рис. 1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гуревич, М.А.** Основы физического эксперимента / М.А. Гуревич. — Ленинград: Наука, 1977.
2. **Бурдун, Г.Д., Марков Б.Н.** Основы метрологии: учебное пособие / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. — М.: Издательство стандартов, 1976.
3. **Новицкий, П.В., Зограф И.А.** Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. — Ленинград: Энергоатомиздат, 1991.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Предисловие | 3 |
| Вводная работа..... | 5 |
| ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» | 24 |
| Лабораторная работа № 20. Измерение основных параметров периодических электрических сигналов | 24 |
| Лабораторная работа № 21. Моделирование электростатических полей | 29 |
| Лабораторная работа № 22. Определение относительной диэлектрической проницаемости жидкого диэлектрика | 34 |
| Лабораторная работа № 23. Определение электроемкости конденсатора методом периодической зарядки и разрядки | 41 |
| Лабораторная работа № 24. Изучение закона Ома для участка цепи, содержащего ЭДС..... | 48 |
| ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО РАЗДЕЛУ «МАГНЕТИЗМ» | 55 |
| Лабораторная работа № 25. Измерение магнитной индукции на оси соленоида и короткой катушки | 55 |
| Лабораторная работа № 26. Изучение действия магнитного поля на проводник с током | 63 |
| Лабораторная работа № 27 (1). Определение удельного заряда электрона методом магнетрона | 69 |
| Лабораторная работа № 27 (2). Определение удельного заряда электрона методом измерения радиуса траектории в магнитном поле катушек Гельмгольца | 78 |
| Лабораторная работа № 28. Изучение намагничивания Ферромагнетика | 85 |
| Лабораторная работа № 29. Изучение затухающих электрических колебаний | 95 |
| Лабораторная работа № 30. Изучение вынужденных электрических колебаний в колебательном контуре | 103 |
| Приложение..... | 110 |
| Список литературы..... | 118 |

Учебное издание

Комов Александр Тимофеевич
Федорович Сергей Дмитриевич
Дедов Алексей Викторович
Барат Артем Александрович
Бочаров Григорий Сергеевич

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие
по курсу

«Общая физика»,

для студентов, обучающихся по направлениям

«Теплоэнергетика и теплотехника»,

«Ядерная энергетика и теплофизика»,

«Энергетическое машиностроение»

Редактор издательства М.И. Аксёнова
Компьютерная верстка Л.В. Валдаевой

| | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Темплан издания МЭИ 2014, учебн. | Подписано в печать 07.07.15 |
| Печать офсетная | Формат 60×84/16 |
| Тираж 300 экз. | Физ. печ. л. 7,5 |
| | Изд. № 15у-007 |
| | Заказ |

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МЭИ, 111250, г. Москва,
ул. Красноказарменная, д. 14

Отпечатано в типографии Издательства МЭИ, 111250, г. Москва,
ул. Красноказарменная, д. 13