

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

Кафедра прикладной физики

Физический практикум

Часть 2

Методические указания к лабораторным работам
по электромагнетизму

Тверь 2025

УДК 537.8 (075.8)
ББК 22.33.я7

Рецензент – доцент кафедры электроснабжения и электротехники Тверского государственного технического университета к.т.н. Корнеев К.Б.

Физический практикум. Часть 2: метод. указания к лабораторным работам по электромагнетизму / А.Н. Болотов [и др.]. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2025. 64 с.

Вводный раздел знакомит студентов с общими требованиями кафедры прикладной физики к проведению лабораторных работ и оформлению их результатов. Основную часть указаний составляют описания экспериментальных установок, методов и порядка проведения лабораторных работ, методики обработки результатов экспериментов. В приложения вынесены порядок обработки результатов измерения; некоторые физические постоянные; множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц. В конце каждого описания работы даны контрольные вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы и ее защиты и рекомендуемая литература.

Предназначены для студентов, выполняющих лабораторные работы по разделу «Электричество и магнетизм» курса физики.

Рассмотрены на заседании кафедры прикладной физики и рекомендованы к изданию (протокол № 3 от 08.10.2024 г.).

© Тверской государственный
технический университет, 2025
© Болотов А.Н., Гусев А.Ф.,
Измайлов В.В., Мишина А.В.,
Новиков В.В., Новикова О.О.,
Новоселова М.В., Раткевич Е.А., 2025

ВВЕДЕНИЕ

Инструкция по проведению занятий в учебных лабораториях

Перед выполнением лабораторных работ все студенты в обязательном порядке должны пройти инструктаж по технике безопасности, о чем расписываются в специальном журнале. Очередность выполнения лабораторных работ и их защиты определяется графиком, имеющимся в лаборатории. Лабораторная работа выполняется группой, состоящей, как правило, из двух студентов.

Допуск студентов к выполнению лабораторных работ

1. Студент должен быть подготовлен к выполнению лабораторных работ как минимум в объеме описания к данной работе.

2. Допуск студентов к выполнению лабораторных работ проводится преподавателем путем опроса.

3. К выполнению текущей лабораторной работы допускаются только студенты:

а) показавшие достаточную подготовку к занятиям, а именно: понимание сущности явлений; знание физических величин и законов, которые лежат в основе данной работы; знание целей работы и принципов устройства измерительных приборов, применяемых в работе;

б) имеющие отчет по выполняемой работе, состоящий из пунктов 1–6 раздела «Требования к отчету по лабораторной работе». Оформление отчета выполняется на листах формата А4 или в отдельной тетради, предназначенной только для лабораторных работ.

4. Студенты, не допущенные к выполнению лабораторной работы, занимаются в лаборатории подготовкой к ней с целью получить разрешение (допуск) к выполнению работы.

5. Студенты, не допущенные к выполнению лабораторной работы или не явившиеся на занятия, выполняют пропущенную работу в часы дополнительных занятий (на отчете по лабораторной работе студента обязательно должно быть разрешение преподавателя на выполнение этой работы).

6. Экспериментальные данные, полученные студентами в процессе выполнения лабораторной работы, подписываются ведущим преподавателем или методистом.

7. После окончания занятий студент обязан привести приборы и оборудование в исходное положение, убрать рабочее место.

Защита лабораторных работ

К защите лабораторных работ студент обязан:

1. Предоставить отчет о проделанной работе, выполненный в соответствии с требованиями раздела «Требования к отчету по лабораторной работе».

2. Знать необходимый теоретический материал (как минимум в объеме контрольных вопросов и заданий, которые имеются в данных методических указаниях).

3. Уметь кратко рассказать о содержании проведенного им эксперимента и сделать выводы по работе.

4. Уметь быстро приближенно производить оценку точности своих измерений.

Допуск, отчет и защита лабораторных работ оцениваются преподавателем по рейтинговой системе.

Требования к отчету по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующие разделы:

1. *Дата выполнения лабораторной работы, ее номер и название.*

2. *Цель работы.*

3. *Приборы и принадлежности.*

4. *Основные расчетные формулы и законы.*

Раздел содержит законы, проверяемые в работе, и формулы, по которым производится расчет экспериментальных результатов.

5. *Схема экспериментальной установки.*

Раздел содержит рисунок установки (схематический) и ее краткое описание.

6. *Таблица(ы) результатов эксперимента.*

7. *Обработка результатов эксперимента.*

В этом разделе представляются численный расчет первого опыта полностью; график (если он требуется) на миллиметровой бумаге размером в тетрадный лист; расчет ошибки результатов эксперимента; расчеты по дополнительным заданиям.

8. *Результат работы.*

Раздел содержит конечный результат работы, расчетные значения по дополнительным заданиям и выводы по работе.

В конце методических указаний находятся приложения, которые содержат алгоритм обработки результатов измерений и некоторые справочные данные.

Лабораторная работа № 3–2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цели работы: ознакомление с методом электрического моделирования, измерение потенциала и напряженности, построение эквипотенциальных и силовых линий электрического поля.

Приборы и принадлежности: вольтметр, набор моделей электростатических полей, набор проводов, координатная бумага, линейка из непроводящего материала.

Характеристики электростатического поля

При конструировании электрических устройств, например: электронных ламп, конденсаторов, электронных линз и других – требуется знать распределение электрического поля в пространстве между электродами. Аналитический расчет полей возможен лишь для простых конфигураций электродов и в общем случае невыполним. Поэтому широко применяются методы экспериментального исследования полей.

Электростатическим полем называется электрическое поле, создаваемое неподвижными электрическими зарядами. Электростатическое поле, как известно, в каждой точке пространства характеризуется напряженностью и потенциалом.

Напряженность $\vec{E}$ электрического поля в данной точке есть физическая величина, численно равная силе $\vec{F}$, действующей на пробный единичный положительный заряд q_0 , помещенный в эту точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (1)$$

Напряженность – векторная силовая характеристика поля, направление которой совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, помещенный в данную точку поля. Единица напряженности электрического поля – ньютон на кулон (Н/Кл) или вольт на метр (В/м). $1 \text{ Н/Кл} = 1 \text{ В/м}$.

Для наглядности электрическое поле изображают на чертеже при помощи *силовых линий (линий напряженности)*, для которых направление касательной в любой точке совпадает с направлением вектора напряженности поля. Линиям напряженности приписывают определенное направление, совпадающее с направлением самого вектора $\vec{E}$. Силовые линии начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах или уходят в бесконечность; они никогда не пересекаются. Модуль напряженности поля пропорционален густоте силовых линий.

Потенциал φ электростатического поля в данной точке есть физическая величина, численно равная энергии W пробного единичного положительного заряда q_0 , помещенного в эту точку поля:

$$\varphi = \frac{W}{q_0}. \quad (2)$$

Потенциал – скалярная энергетическая характеристика электростатического поля. Единица потенциала электростатического поля – вольт (В).

Соответственно, для наглядного изображения полей используются *эквипотенциальные поверхности* (на плоском чертеже – *эквипотенциальные линии*), во всех точках которых потенциал имеет одно и то же значение. Силовые линии всегда ортогональны к эквипотенциальным поверхностям.

Между напряженностью и потенциалом существует однозначная связь, которая в общем случае определяется выражением

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right), \text{ или } \vec{E} = -\text{grad } \varphi, \quad (3)$$

где знак « $-$ » показывает, что вектор $\vec{E}$ направлен в сторону убывания потенциала.

В случае поля с центральной симметрией, когда потенциал зависит лишь от одной координаты: $\varphi = \varphi(r)$ (ось координат Or совпадает с радиальной прямой), векторное соотношение (3) в проекции на ось Or принимает вид

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}. \quad (4)$$

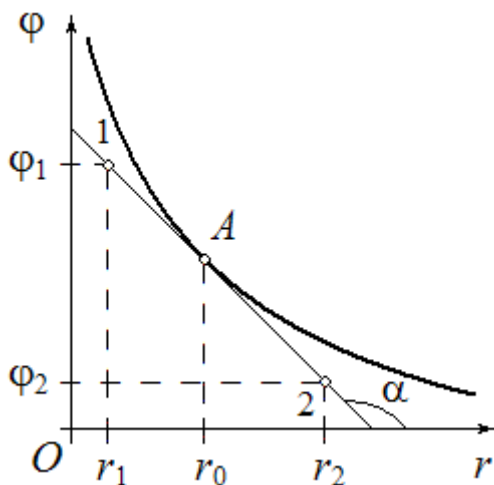


Рис. 1. Определение E графическим дифференцированием

На рис. 1 показан способ графического дифференцирования, используемый для определения напряженности по известному графику зависимости потенциала $\varphi = \varphi(r)$.

Как известно, значение производной функции в заданной точке численно равно тангенсу угла α наклона касательной, проведенной в этой точке к кривой, изображающей график функции (угловому коэффициенту).

Рассчитаем проекцию напряженности на ось координат Or в точке поля с координатой r_0 . Для этого отметим на кривой $\varphi = \varphi(r)$ точку A с координатой r_0 ,

проведем касательную в этой точке и выберем на ней две точки 1 и 2 (они должны располагаться как можно дальше друг от друга и могут совпадать с точками пересечения прямой и осей координат). Угловой коэффициент

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \varphi}{\Delta r} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{r_2 - r_1}.$$

Согласно соотношению (4), рассчитаем проекцию напряженности E в точке с координатой r_0 по формуле

$$E = -\frac{\Delta \varphi}{\Delta r} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{r_2 - r_1}. \quad (5)$$

Потенциал является скалярной функцией координат, а напряженность – векторной, поэтому определение потенциала проще, чем напряженности. В данной работе экспериментально изучается распределение потенциала, строится график зависимости $\varphi = \varphi(r)$ и картина эквипотенциальных линий, а напряженность определяется по найденному распределению потенциала.

Метод электрического моделирования

Определение потенциала в электростатическом поле экспериментально сложно. Поэтому прибегают к моделированию, заменяя электростатическое поле, создаваемое неподвижными зарядами в непроводящей среде (вакууме или диэлектрике), его точной, но более удобной моделью – электрическим полем в проводящей среде, измерения в которой проще. В данной работе электростатическое поле между электродами моделируется полем стационарного электрического тока между медными электродами такой же формы. В качестве проводящей среды использована электропроводная бумага, обладающая высоким удельным сопротивлением.

Правомерность такого моделирования обусловлена следующими соображениями. Распределение электрического поля в пространстве определяется системой дифференциальных уравнений Максвелла в частных производных, решение которых зависит также от граничных условий. Если форма уравнений, описывающих как поле стационарного тока, так и электростатическое поле, при одинаковых граничных условиях одинакова, то характеристики электрического поля в обоих случаях также одинаковы. Покажем, что форма уравнений при моделировании сохраняется.

Уравнения Максвелла для электростатического поля при отсутствии объемных электрических зарядов имеют вид:

$$\oint_S E_n dS = 0; \quad (6)$$

$$\oint_L E_l dl = 0. \quad (7)$$

Уравнение (6) – это не что иное, как теорема Гаусса при отсутствии объемных электрических зарядов, а уравнение (7) – условие потенциальности электростатического поля.

С другой стороны, для любой замкнутой поверхности в пространстве между электродами, в котором течет стационарный ток плотностью $\vec{j}$, можно записать по закону сохранения электрического заряда

$$\oint_S \vec{j}_n dS = 0, \quad (8)$$

т.е. количество зарядов, вошедших внутрь поверхности, равно количеству зарядов, вышедших из нее. Используя закон Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (9)$$

где σ – удельная проводимость среды, из уравнений (8) и (9) получаем

$$\oint_S \vec{E}_n dS = 0. \quad (10)$$

Кроме того, очевидно, что в отсутствие переменных магнитных полей для стационарного тока циркуляция вектора напряженности равна нулю:

$$\oint_L \vec{E}_l dl = 0. \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) описывают поле стационарного тока между электродами данной формы.

Уравнения (6) и (7) для электростатического поля полностью идентичны уравнениям (10) и (11) для поля стационарного тока. Проводимость среды между электродами (электропроводной бумаги) намного меньше проводимости материала электродов (меди), поэтому поверхность последних является практически эквипотенциальной, как и в случаях электростатического поля, т.е. граничные условия также одинаковы.

Следует отметить, что уравнения, идентичные уравнениям (6) и (7), описывают также поле скоростей текущей жидкости и температурное поле, что позволяет решать задачи гидродинамики и теплопроводности методом электрического моделирования.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Исследование центрально симметричного электростатического поля (модель № 1)

1. Заготовить листы координатной бумаги и изобразить на них в масштабе схематический чертеж модели № 1 – контуры исследуемого поля и электродов.

2. Собрать цепь с моделью № 1 согласно электрической схеме, изображенной на рис. 2.

3. Получив разрешение, включить вилку питания цепи в розетку постоянного тока с напряжением 24 В.

4. Перемещая щуп вольтметра по произвольному радиусу модели и наблюдая за показаниями прибора, выбрать 7 точек для измерения потенциала.

Точки должны быть расположены на приблизительно равном расстоянии друг от друга, включая точки, расположенные вблизи центрального и периферийного электродов.

Измерить вольтметром потенциалы $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_7$ в выбранных точках и занести результаты в табл. 1. Желательно выбрать такие точки, чтобы им соответствовали целочисленные значения показаний вольтметра.

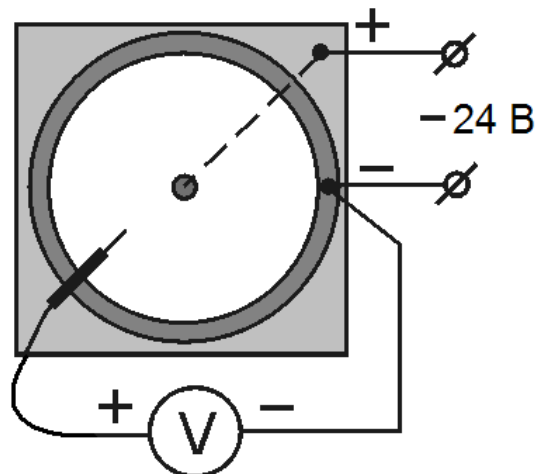


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (модель № 1)

Таблица 1. Результаты эксперимента 1

№ точки	1	2	3	4	5	6	7
φ , В							
r , мм							
$\langle r \rangle$, мм							

5. Совместив 0 линейки с центром модели и перемещая щуп вольтметра вдоль линейки, измерить расстояния $r_1, r_2, \dots, r_7$ от центра модели до точек с выбранными потенциалами. Результаты измерения занести в табл. 1.

6. Повторить измерения расстояний $r_1, r_2, \dots, r_7$ до точек с выбранными потенциалами: $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_7$ еще в трех направлениях. Результаты измерения занести в табл. 1.

Упражнение 2. Исследование электростатического поля (модель № 2)

1. На координатной бумаге изобразить в масштабе схематический чертеж модели № 2 – контуры исследуемого поля с координатной сеткой и контуры электродов.

2. Собрать цепь с моделью № 2 согласно электрической схеме, приведенной на рис. 3. Полярность электродов выбирается произвольно.

3. Получив разрешение, включить вилку питания цепи в розетку постоянного тока с напряжением 24 В.

4. Отметить на схематическом чертеже модели № 2 точки, от которых начнется построение эквипотенциальных линий (задаются преподавателем, пример см. на рис. 3).

5. Измерить потенциал ϕ_1 в первой исходной точке. Перемещая щуп вольтметра по полю модели и наблюдая за показаниями прибора, найти еще несколько точек с потенциалом ϕ_1 .

Точки должны быть расположены на приблизительно равном расстоянии друг от друга, включая точки, расположенные на краю модели.

Нанести эти точки на схематический чертеж модели и у края чертежа указать соответствующее значение потенциала $\phi_1 = \dots$ В.

6. Прodelать измерения согласно пункту 5 для потенциалов $\phi_2, \phi_3, \dots$.

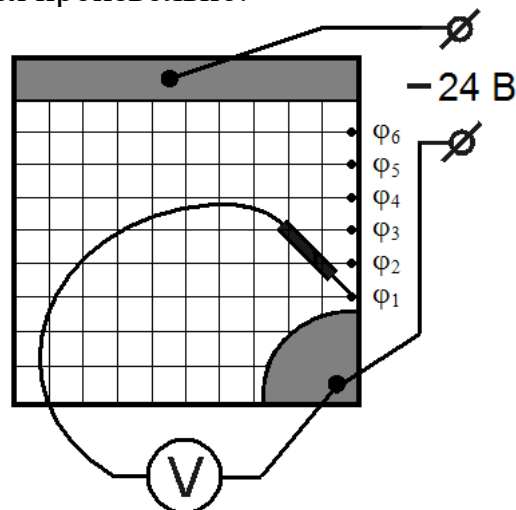


Рис. 3. Схема экспериментальной установки (модель № 2)

Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 1 найти средние значения расстояния $\langle r_1 \rangle, \langle r_2 \rangle, \dots, \langle r_7 \rangle$ от центра модели № 1 до точек с выбранными потенциалами $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_7$.

2. По рассчитанным значениям $\langle r \rangle$ построить график зависимости $\phi = \phi(r)$ в виде плавной кривой.

3. На кривой $\phi = \phi(r)$ выбрать не менее 5 точек и, применяя метод графического дифференцирования, рассчитать по формуле (5) соответствующие им значения напряженностей: $E_1, E_2, \dots, E_5$. Результаты измерений из графика $\phi = \phi(r)$ и расчетов записать в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчетов

№ точки	1	2	3	4	5
r , мм					
$\Delta\phi$, В					
Δr , мм					
E , В/мм					

4. По данным табл. 2 построить график зависимости $E = E(r)$.

5. На схематическом чертеже модели № 1:

по среднему значению расстояний $\langle r \rangle$ (см. табл. 1) нанести эквипотенциальные линии в виде концентрических окружностей и указать на чертеже соответствующие им значения потенциала: $\phi_1 = \dots$ В, $\phi_2 = \dots$ В, $\dots$, $\phi_7 = \dots$ В;

ортогонально к эквипотенциальным линиям провести силовые линии, которые должны располагаться по всему полю модели и указать стрелками их направление. Линии должны начинаться и заканчиваться на электродах.

6. На схематическом чертеже модели № 2:

соединяя плавными линиями точки с одинаковым потенциалом, изобразить эквипотенциальные линии для потенциалов: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$;

провести силовые линии, которые должны располагаться по всему полю модели (не менее 5...6 силовых линий) и указать стрелками их направление;

показать знаками «+» и «-» полярность электродов.

Результаты работы

Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какое поле называется электростатическим?
2. Какое поле называется однородным, неоднородным? Приведите примеры.
3. Каков физический смысл вектора напряженности электрического поля? Как он направлен?
4. Каков физический смысл потенциала электростатического поля?
5. Что такое силовые линии и эквипотенциальные поверхности?
6. Как вычисляется работа по перемещению заряда в электростатическом поле?
7. По какой формуле можно рассчитать напряженность и потенциал поля точечного заряда, электрического диполя?
8. Сформулируйте теорему Гаусса. Рассчитайте с помощью теоремы Гаусса напряженность поля равномерно заряженной плоскости, сферической поверхности, тонкой нити и шара.
9. Сформулируйте условие потенциальности поля. Является ли электростатическое поле потенциальным?
10. Выведите зависимость между напряженностью и потенциалом электростатического поля.
11. В чем заключается метод электрического моделирования?
12. Какое движение совершают свободные точечные электрические заряды и электрические диполи в однородном и неоднородном полях?
13. Потенциал электрического поля меняется по закону $\varphi = 10/r^2$ В. Рассчитайте напряженность поля при $r = 1$ м.
14. Напряженность электрического поля меняется по закону $E = 2r$ В/м. Рассчитайте потенциал поля в точке $r = 2$ м, если в точке $r = 3$ м потенциал поля равен 6 В.

Дополнительная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. СПб.: Лань, 2022. §5, 6, 8.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2016. §77–86.

Лабораторная работа № 3–3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы – определение удельного заряда электрона с помощью двухэлектродной лампы.

Приборы и принадлежности: панель с двухэлектродной лампой и соленоидом, реостатами, амперметром и миллиамперметром постоянного тока; вольтметр; набор проводов.

Описание метода определения удельного заряда и экспериментальной установки

Удельным зарядом электрона e/m называется отношение заряда электрона e к его массе m . Для определения удельного заряда используются закономерности движения электронов в кольцевом пространстве между анодом и катодом двухэлектродной лампы (вакуумного диода), помещенной в магнитное поле. Вакуумный диод (рис. 1) представляет собой стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, содержащий внутри два металлических электрода: анод А и катод К. В результате термоэлектронной эмиссии из нагретого катода вылетают электроны. Анод имеет форму цилиндра, коаксиально окружающего катод. На анод подается положительный потенциал (относительно катода), т.е. напряженность электрического поля $\vec{E}$ в лампе направлена по радиусу от анода к катоду. Под действием электрического поля вылетевшие из катода электроны начнут двигаться к аноду, через диод потечет анодный ток.

Лампа помещается внутри соленоида (катушки с током), создающего магнитное поле, вектор индукции которого $\vec{B}$ параллелен оси анода Z.

Рассмотрим движение электрона под действием электрического и магнитного полей, показанных на рис. 1. Траектории движения электронов представлены на рис. 2.

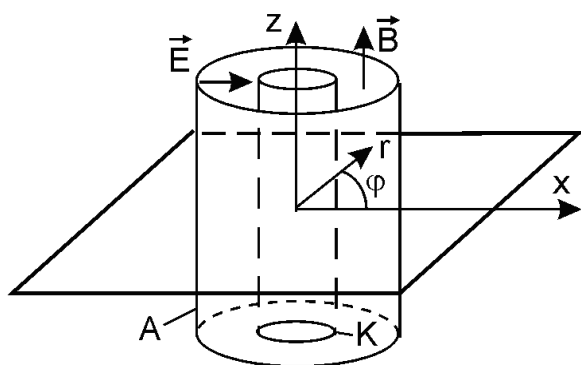


Рис. 1. Вакуумный диод

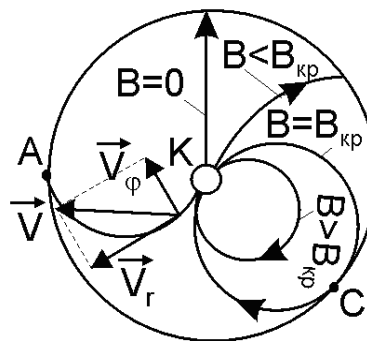


Рис. 2. Траектории движения электронов
в зависимости от величины
магнитной индукции

При отсутствии магнитного поля траектория электрона прямолинейна и направлена вдоль радиуса от катода К к аноду А. При слабом магнитном поле траектория слегка искривляется под действием силы Лоренца, но электрон еще попадает на анод. Наконец, при $B > B_{кр}$ электрон не достигает анода. Поэтому

зависимость анодного тока от индукции магнитного поля должна иметь вид, показанный на рис. 3 пунктирной линией. Однако разброс начальных скоростей, некоторая несоосность катода и анода и другие причины приводят к тому, что эта зависимость имеет вид, показанный сплошной линией.

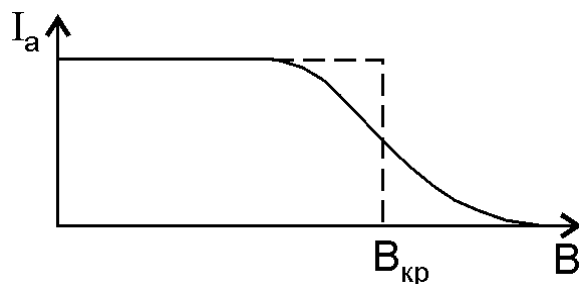


Рис. 3. Зависимость анодного тока от индукции магнитного поля

Для описания движения электрона используем полярные координаты r , ϕ (см. рис. 1). Начальной скоростью электронов пренебрегаем. Работа электрического поля

$$A = e \cdot U_a, \quad (1)$$

где e – модуль заряда электрона; U_a – анодное напряжение.

Магнитное поле работы не совершает, так как сила Лоренца перпендикулярна скорости электрона. Поэтому по закону сохранения энергия электрона равна работе сил электрического поля:

$$e \cdot U_a = \frac{m v^2}{2} = \frac{m}{2} (v_r^2 + v_\phi^2), \quad (2)$$

где v_r и v_ϕ – радиальная и угловая компоненты скорости электрона (см. рис. 2).

При $B = B_{кр}$ траектория электрона только касается анода в точке С с координатой $r = r_a$ (см. рис. 2), поэтому в точке касания радиальная компоненты скорости $v_r = 0$ и выполняется соотношение

$$e \cdot U_a = \frac{m v_\phi^2}{2}. \quad (3)$$

Величину $v_\phi = r \cdot \omega$ найдем из уравнения движения электрона под действием силы Лоренца:

$$J_z \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_z, \quad (4)$$

где M_z – момент силы Лоренца относительно оси Z ; $J_z = m \cdot r^2$ – момент инерции электрона относительно оси Z . Величина момента силы Лоренца

$$M_z = r \cdot F_\perp = r \cdot e \cdot v_r \cdot B = r \cdot e \cdot B \cdot \frac{dr}{dt}. \quad (5)$$

Подставив величину M_z из уравнения (5) в уравнение (4) и интегрируя последнее, получаем

$$m \cdot r^2 \cdot \omega = e \cdot B \cdot r^2/2, \quad (6)$$

откуда

$$v_\phi = \omega \cdot r = \frac{e \cdot B \cdot r}{2 \cdot m}. \quad (7)$$

Подставив v_ϕ из уравнения (7) в уравнение (3) и решив полученное выражение относительно величины e/m , получим

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

где $r_a = 5$ мм – радиус анода; U_a – анодное напряжение; $B_{кр}$ – критическое значение индукции магнитного поля, при котором начинается быстрый спад анодного тока (см. рис. 3). Таким образом, для определения удельного заряда электрона необходимо по результатам эксперимента найти критическое значение индукции магнитного поля $B_{кр}$ при заданном анодном напряжении U_a и известном радиусе анода r_a .

Электрическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 4. Двухэлектродная лампа AK с цилиндрическим анодом радиусом $r_a = 5$ мм помещена внутрь соленоида L . На лампу подается постоянное напряжение 24 В от щита питания лабораторного стола. Изменение анодного напряжения осуществляется реостатом R_1 , подключенным по схеме потенциометра. Вольтметр V и миллиамперметр mA служат для регистрации анодных напряжения и тока. Питание цепи накала лампы осуществляется переменным напряжением 3 В от щита питания лабораторного стола. Цепь соленоида также питается постоянным напряжением 24 В. Изменение тока соленоида производится реостатом R_2 , подключенным по схеме переменного сопротивления. Регистрация тока соленоида $I_{сол}$ осуществляется амперметром A .

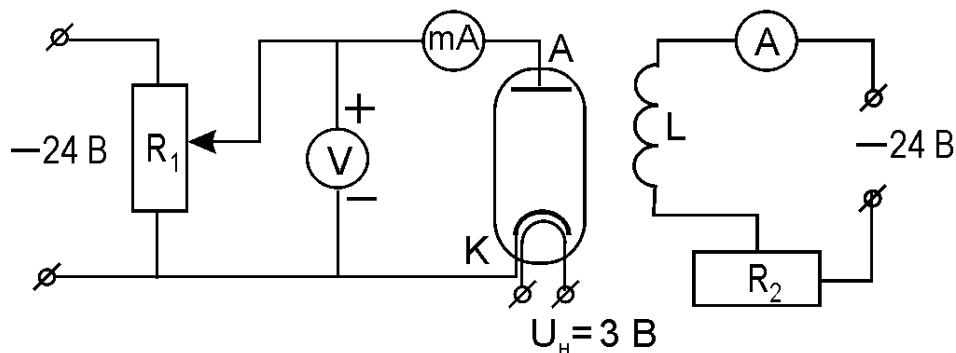


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Подсоединить шнуры питания и вольтметр к схеме, собранной на панели (см. рис. 4). Установить на вольтметре предел измерения постоянного напряжения 30 В. Определить цену деления вольтметра, амперметра и миллиамперметра. Реостат R_2 поставить на максимальное сопротивление.

2. Получив разрешение преподавателя, включить цепь питания соленоида в розетку постоянного напряжения 24 В. Убедиться в правильности полярности подключения по отклонению стрелки амперметра.

3. Включить в розетку постоянного напряжения 24 В схему питания двухэлектродной лампы. Убедиться в правильности полярности подключения по отклонению стрелки вольтметра. С помощью реостата R_1 установить анодное напряжение $U_a = 20$ В.

4. На нить накала подать напряжение U_n от розетки ~ 3 В. После нагрева

лампы миллиамперметр покажет анодный ток I_a , значение которого записать в таблицу.

5. Меняя с помощью реостата R_2 ток соленоида $I_{\text{сол}}$ через два деления амперметра до максимально возможного значения, записать значения тока в соленоиде $I_{\text{сол}}$ и анодного тока I_a в таблицу.

В процессе измерений необходимо следить за показаниями вольтметра, поддерживая постоянное анодное напряжение U_a .

Результаты эксперимента

№	$I_{\text{сол}}$, А	$U_a = 20 \text{ В}$				$U_a = 15 \text{ В}$				$U_a = 10 \text{ В}$			
		I_a , мА	$I_{\text{сол}}^{\text{кр}}$, А	$B_{\text{кр}}$, мТл	e/m , Кл/кг	I_a , мА	$I_{\text{сол}}^{\text{кр}}$, А	$B_{\text{кр}}$, мТл	e/m , Кл/кг	I_a , мА	$I_{\text{сол}}^{\text{кр}}$, А	$B_{\text{кр}}$, мТл	e/m , Кл/кг
1													
2													
...													

6. Согласно пункту 5 при тех же значениях $I_{\text{сол}}$ измерить токи I_a для напряжения $U_a = 15 \text{ В}$ и $U_a = 10 \text{ В}$. Данные занести в таблицу.

Обработка результатов эксперимента

1. По данным таблицы построить (в одной координатной системе) графики зависимости $I_a = f(I_{\text{сол}})$ для трех опытов ($U_a = 20, 15$ и 10 В).

2. Проводя касательные к кривым зависимости анодного тока от тока в соленоиде через точку перегиба П (рис. 5), определить критические значения тока в соленоиде $I_{\text{сол}}^{\text{кр}}$, при которых начинается быстрый спад анодного тока для напряжений $U_a = 20, 15$ и 10 В .

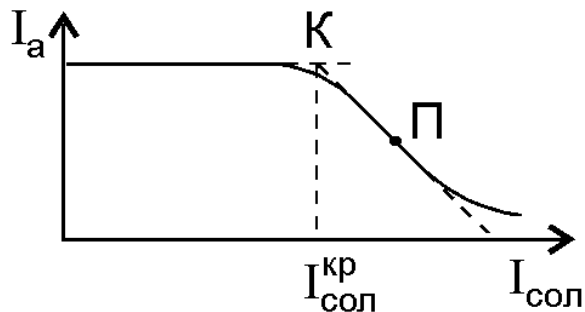


Рис. 5. Пример определения критического значения силы тока в соленоиде

3. По величине $I_{\text{сол}}^{\text{кр}}$ с помощью тапировочного графика (рис. 6) определить и записать в таблицу величины $B_{\text{кр}}$ для всех трех опытов.

4. По формуле (8) вычислить значения e/m при всех трех анодных напряжениях.

5. Вычислить среднее значение удельного заряда $\langle e/m \rangle$, доверительный интервал $\Delta_{e/m}$ и относительную погрешность измерения E согласно прилож. 1.

6. Сравнить экспериментально определенное значение e/m с табличным, используя формулу

$$E' = \frac{|(e/m)_{\text{таб}} - e/m|}{(e/m)_{\text{таб}}} \cdot 100 \, \%.$$

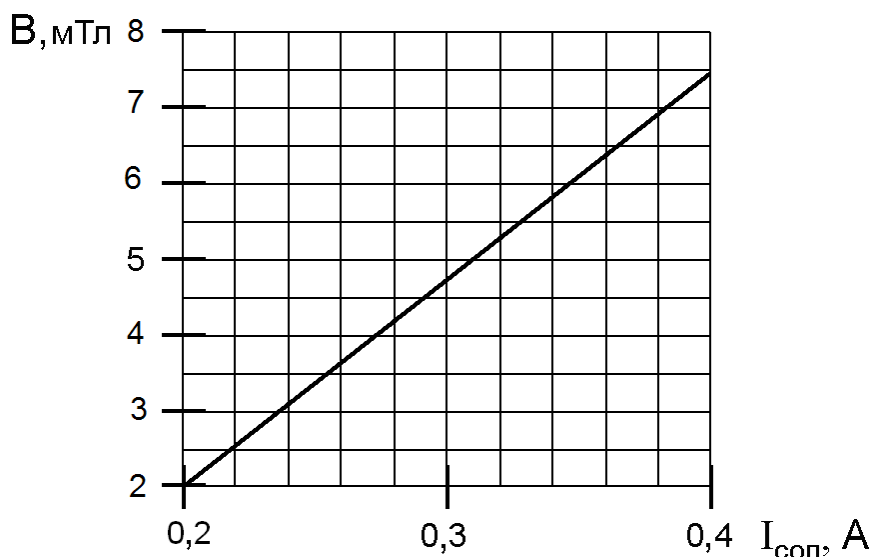


Рис. 6. Тарировочный график

Результаты работы

1. Записать значение удельного заряда в виде:

$$e/m = \langle e/m \rangle \pm \Delta_{e/m}; \quad E = \dots \%$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое сила Лоренца, как определяется ее величина и направление?
2. Электрон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно его силовым линиям. Запишите уравнение движения электрона. Какой вид имеет траектория электрона в этом случае?
3. Изобразите вектора сил, действующих на электрон в произвольной точке его траектории (см. рис. 2), и объясните различные формы траектории электрона.
4. Какие методы, кроме использованного в работе, существуют для определения удельного заряда электрона?
5. В каких устройствах одновременно действуют электрические и магнитные поля на заряженные частицы?
6. Чему равна работа сил электрического поля и работа силы Лоренца?
7. Объясните вид графиков зависимостей анодного тока от индукции магнитного поля (см. рис. 3) и от силы тока в соленоиде (см. рис. 5).
8. Зависит ли величина e/m от величины анодного напряжения U_a ?
9. Зачем на нить накала электронной лампы подают напряжение U_n ?

Дополнительная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. СПб.: Лань, 2022. §40, 43, 50, 72–74.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2016. §1–5, 114–116.

Лабораторная работа № 3–3(М) ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы – определение удельного заряда электрона с помощью двухэлектродной лампы.

Приборы и принадлежности: модуль ИП, модуль ФПЭ-03, миллиамперметр постоянного тока; набор проводов.

Описание метода определения удельного заряда

Удельным зарядом электрона e/m называется отношение заряда электрона e к его массе m . Для определения удельного заряда используются закономерности движения электронов в кольцевом пространстве между анодом и катодом двухэлектродной лампы (вакуумного диода), помещенной в магнитное поле. Вакуумный диод (рис. 1) представляет собой стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, содержащий внутри два металлических электрода: анод А и катод К. В результате термоэлектронной эмиссии из нагретого катода вылетают электроны. Анод имеет форму цилиндра, коаксиально окружающего катод. На анод подается положительный потенциал (относительно катода), т.е. напряженность электрического поля $\vec{E}$ в лампе направлена по радиусу от анода к катоду (рис. 1). Под действием электрического поля вылетевшие из катода электроны начнут двигаться к аноду, через диод потечет анодный ток.

Лампа помещается внутри соленоида (катушки индуктивности) с током, создающего магнитное поле, вектор индукции которого $\vec{B}$ параллелен по оси анода Z (рис. 1).

Рассмотрим движение электрона под действием электрического и магнитного полей, показанных на рис. 1. Траектории движения электронов при различных значениях индукции магнитного поля представлены на рис. 2.

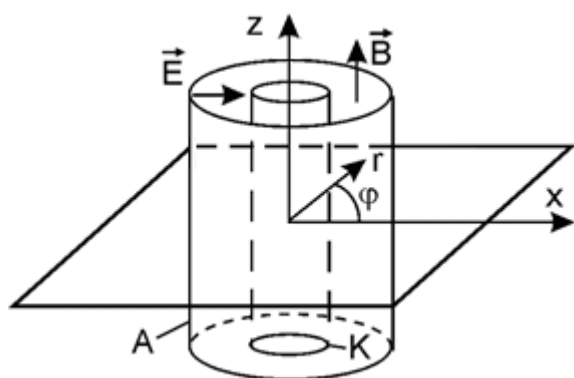


Рис. 1. Вакуумный диод

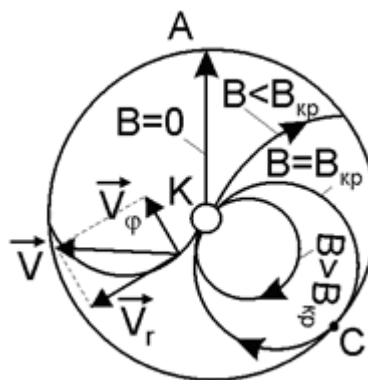


Рис. 2. Траектории движения электронов в зависимости от величины магнитной индукции

При отсутствии магнитного поля ($B = 0$) траектория электрона прямолинейна и направлена вдоль радиуса от катода К к аноду А. При слабом магнитном поле траектория слегка искривляется под действием силы Лоренца, но электрон еще попадает на анод. С увеличением индукции магнитного поля

траектория электрона все больше искривляется, при некотором критическом значении индукции $B_{кр}$ траектория электрона только касается анода ($B = B_{кр}$). При $B > B_{кр}$ электрон не достигает анода. Поэтому зависимость анодного тока I_a от индукции магнитного поля B имеет вид, показанный на рис. 3 пунктирной линией. Однако разброс начальных скоростей, некоторая несоосность катода и анода и другие причины приводят к тому, что эта зависимость имеет вид, показанный сплошной линией.

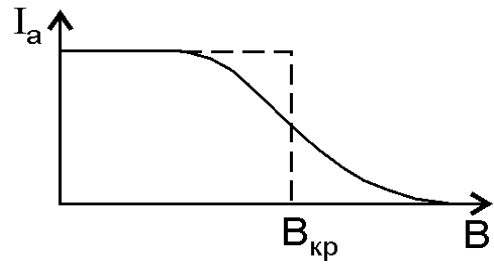


Рис. 3. Зависимость анодного тока от индукции магнитного поля

Для описания движения электрона используем полярные координаты: радиус r и угол φ (см. рис. 1). Начальной скоростью электронов пренебрегаем. Работа сил электрического поля

$$A = e \cdot U_a,$$

где e – модуль заряда электрона; U_a – анодное напряжение.

Магнитное поле работы не совершает, так как сила Лоренца перпендикулярна скорости электрона. Поэтому по закону сохранения энергия электрона равна работе сил электрического поля:

$$e \cdot U_a = \frac{m v^2}{2} = \frac{m}{2} (v_r^2 + v_\varphi^2),$$

где v_r и v_φ – радиальная и угловая компоненты скорости электрона v (см. рис. 2).

При $B = B_{кр}$ траектория электрона только касается анода в точке C с координатой $r = r_a$, где r_a – радиус анода (см. рис. 2), поэтому в точке касания радиальная компонента скорости $v_r = 0$, следовательно, выполняется соотношение

$$e \cdot U_a = \frac{m v_\varphi^2}{2}. \quad (1)$$

Величину скорости $v_\varphi = r \cdot \omega$ найдем из уравнения движения электрона под действием силы Лоренца:

$$J_z \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_z, \quad (2)$$

где $J_z = m \cdot r^2$ – момент инерции электрона относительно оси Z ; $\frac{d\omega}{dt}$ – производная угловой скорости ω по времени t (угловое ускорение); M_z – момент силы Лоренца относительно оси Z . Величина момента силы Лоренца

$$M_z = r \cdot F_L = r \cdot e \cdot v_r \cdot B = r \cdot e \cdot \frac{dr}{dt} \cdot B. \quad (3)$$

Подставив величину M_z из уравнения (3) в уравнение (2) и интегрируя последнее, получаем:

$$m \cdot r^2 \cdot \omega = e \cdot B \cdot r^2 / 2; \quad r \cdot \omega = e \cdot B \cdot r / (2m),$$

откуда

$$v_{\varphi} = r \cdot \omega = \frac{e \cdot B \cdot r}{2 \cdot m}. \quad (4)$$

Подставив v_{φ} из выражения (4) в (1) и решив полученное уравнение относительно величины e/m , получим

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2}, \quad (5)$$

где $B_{кр}$ – критическое значение индукции магнитного поля, при котором начинается быстрый спад анодного тока (см. рис. 3).

Таким образом, для определения удельного заряда электрона необходимо по результатам эксперимента найти критическое значение индукции магнитного поля $B_{кр}$ при заданном анодном напряжении U_a и известном радиусе анода r_a .

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 4) включает в себя модуль ИП – источник питания постоянного тока с вольтметром и амперметром; модуль ФПЭ-03, содержащий соленоид и двухэлектродную лампу; миллиамперметр постоянного тока. Источник питания ИП и модуль ФПЭ-03 соединяются между собой специальным кабелем, подключенным к разъемам на задних панелях модулей. Миллиамперметр mA подключается к гнездам РА на лицевой панели модуля ФПЭ-03: клемма «–» на миллиамперметре – к верхнему гнезду; клемма «5 mV» – к нижнему гнезду.

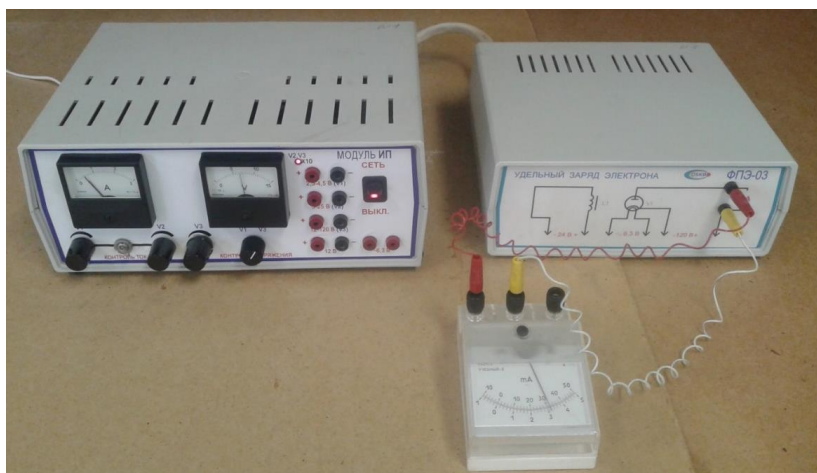


Рис. 4. Экспериментальная установка

Электрическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 5. В корпусе модуля ФПЭ-03 установлен соленоид L . Цепь соленоида питается постоянным напряжением 24 В от источника питания ИП. Изменение тока соленоида производится вращением ручки регулятора «V2» на передней панели ИП. В данной установке минимальное возможное значение тока соленоида $I_{сол}$ составляет 0,6 А. Регистрация тока соленоида $I_{сол}$ осуществляется амперметром на передней панели ИП.

Внутри соленоида размещена двухэлектродная лампа АК с цилиндрическим анодом радиусом $r_a = 6$ мм. Питание накала лампы осуществляется

переменным напряжением $U_H = 6,3$ В от источника питания ИП.

На лампу подается постоянное напряжение U_a (предельное значение 120 В) от источника питания ИП. Изменение анодного напряжения производится плавным вращением ручки регулятора «V3» на передней панели ИП. Контроль величины анодного напряжения U_a осуществляется по вольтметру на передней панели ИП.

Регистрация анодного тока I_a производится по миллиамперметру, подключенному к гнездам РА модуля ФПЭ-03.

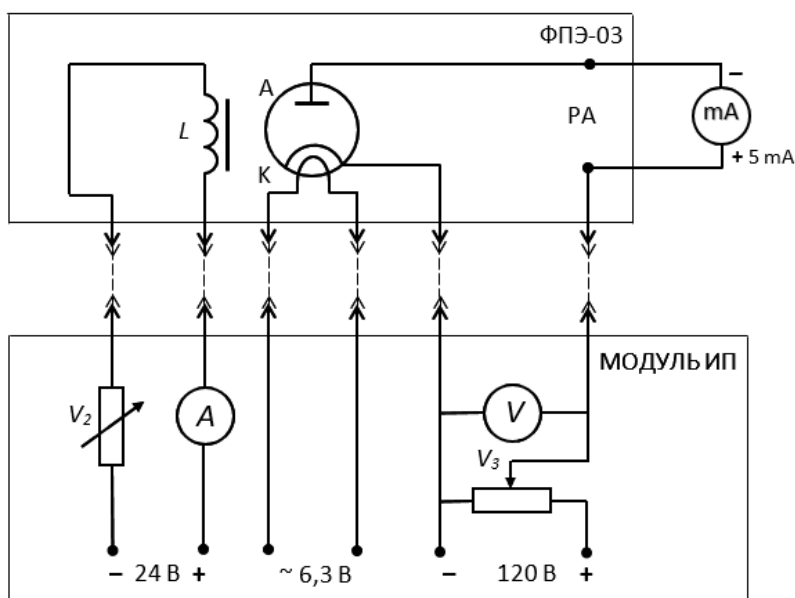


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Записать в таблицу три значения анодного напряжения U_a . Задаются преподавателем из интервала 70...100 В. Например: $U_{a1} = 70$ В, $U_{a2} = 85$ В, $U_{a3} = 100$ В или $U_{a1} = 75$ В, $U_{a2} = 85$ В, $U_{a3} = 95$ В.

Результаты эксперимента

№	$I_{\text{сол}}$, А	$U_{a1} =$ В				$U_{a2} =$ В				$U_{a3} =$ В			
		I_a , мА	$I_{\text{кр}}^{\text{сол}}$, А	$B_{\text{кр}}$, мТл	e/m , Кл/кг	I_a , мА	$I_{\text{кр}}^{\text{сол}}$, А	$B_{\text{кр}}$, мТл	e/m , Кл/кг	I_a , мА	$I_{\text{кр}}^{\text{сол}}$, А	$B_{\text{кр}}$, мТл	e/m , Кл/кг
1	0,6												
2													
...													

2. Подготовить экспериментальную установку к работе. На передней панели модуля ИП (рис. 6):

тумблер «Контроль тока» переключить в правое положение на «V2»;

рукоятку «Контроль напряжения» переключить (повернуть) в крайнее правое положение на «V3»;

рукоятки регулировки «V2» и «V3» перевести в крайнее положение, вращая их против часовой стрелки до упора.



Рис. 6. Передняя панель модуля ИП

3. Получив разрешение преподавателя, подключить вилку сетевого шнура модуля ИП к розетке переменного напряжения 220 В. Включить источник питания тумблером «СЕТЬ/ВЫКЛ.» на лицевой панели ИП, переведя его в верхнее положение – «СЕТЬ». При этом на тумблере засветится индикатор подключения.

4. Плавно вращая рукоятку регулировки напряжения «V3», установить на вольтметре первое значение анодного напряжения U_{a1} . Светящийся светодиод справа от вольтметра указывает на значение множителя шкалы ($\times 10$), т.е. показания стрелки по шкале прибора надо умножать на 10.

5. Меняя с помощью рукоятки регулировки «V2» ток соленоида $I_{\text{сол}}$ от 0,6 А с интервалом 0,1 А (через одно деление амперметра), записывать значения тока в соленоиде $I_{\text{сол}}$ и соответствующие им значения анодного тока I_a в таблицу. Закончить измерения, если анодный ток $I_a = 0$ мА.

В процессе измерений следует следить за показаниями вольтметра, поддерживая постоянным заданное анодное напряжение U_a .

6. Согласно пункту 5 для тех же, что и в первом опыте значений тока соленоида $I_{\text{сол}}$, измерить значения анодного тока I_a для напряжения U_{a2} и U_{a3} . Данные занести в таблицу.

Обработка результатов эксперимента

1. По данным таблицы построить (в одной координатной системе) графики зависимости $I_a = f(I_{\text{сол}})$ для трех опытов (U_{a1} , U_{a2} , U_{a3}).

2. Проводя через точку перегиба П (рис. 7) касательную к кривой зависимости $I_a = f(I_{\text{сол}})$, определить критическое значения тока в соленоиде $I_{\text{сол}}^{\text{кр}}$, при котором начинается быстрый спад анодного тока, для трех опытов. Результаты записать в таблицу.

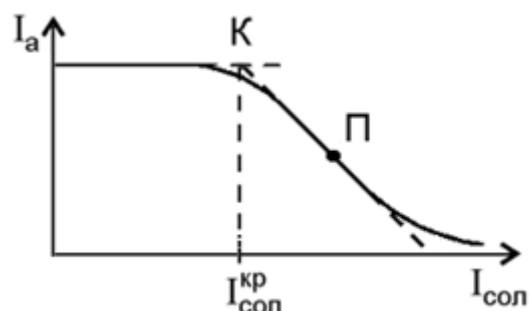


Рис. 7. Пример определения критического значения силы тока в соленоиде

3. По величине $I_{\text{сол}}^{\text{кр}}$ рассчитать критическое значение индукции магнитного поля соленоида для трех опытов по формуле

$$B_{\text{кр}} = \mu_0 \cdot I_{\text{сол}}^{\text{кр}} \cdot n,$$

где μ_0 – магнитная постоянная; n – число витков на единицу длины соленоида (указано на установке). Результат записать в таблицу.

4. По формуле (5) вычислить значения e/m для трех опытов. Результат записать в таблицу.

5. Вычислить среднее значение удельного заряда $\langle e/m \rangle$, доверительный интервал $\Delta_{e/m}$ и относительную погрешность измерения E согласно прилож. 1.

6. Сравнить экспериментально определенное значение e/m с табличным, используя формулу

$$E = \frac{|(e/m)_{\text{таб}} - e/m|}{(e/m)_{\text{таб}}} \cdot 100 \, \%.$$

Результаты работы

1. Записать значение удельного заряда в виде:

$$e/m = \langle e/m \rangle \pm \Delta_{e/m}; \quad E = \quad \%.$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое сила Лоренца, как определяется ее величина и направление?

2. Электрон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно его силовым линиям. Запишите уравнение движения электрона. Какой вид имеет траектория электрона в этом случае?

3. Изобразите векторы сил, действующих на электрон в произвольной точке его траектории (см. рис. 2), и объясните различные формы траектории электрона.

4. Какие методы, кроме использованного в работе, существуют для определения удельного заряда электрона?

5. В каких устройствах одновременно действуют электрические и магнитные поля на заряженные частицы?

6. Чему равна работа сил электрического поля и работа силы Лоренца?

7. Объясните вид графиков зависимостей анодного тока от индукции магнитного поля (см. рис. 3) и от силы тока в соленоиде (см. рис. 7).

8. Зависит ли величина e/m от величины анодного напряжения U_a ?

9. Зачем на нить накала электронной лампы подают напряжение U_n ?

Дополнительная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. СПб.: Лань, 2022. §40, 43, 50, 72–74.

2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2016. §1–5, 114–116.

Лабораторная работа № 3–4 ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ САМОИНДУКЦИИ

Цели работы: изучение явления самоиндукции при включении и выключении тока, определение индуктивности цепи.

Приборы и принадлежности: панель с индуктивностью, постоянным сопротивлением, источником постоянного напряжения и поляризационным реле; магазин сопротивлений; набор проводов.

Явление самоиндукции

Электрический ток, текущий в проводящем контуре, создает сцепленный с этим контуром полный магнитный поток (потокосцепление):

$$\Psi = N \cdot \Phi = N \cdot \int_S B_n \cdot dS. \quad (1)$$

где Φ – магнитный поток через каждый виток контура; B_n – проекция вектора магнитной индукции на нормаль к плоскости контура; S – площадь контура; N – число витков контура.

По закону Био – Савара – Лапласа магнитная индукция пропорциональна силе тока, создающего магнитное поле, т.е. $B \sim I$. Поэтому и потокосцепление в контуре также оказывается пропорциональным силе тока: $\Psi \sim I$, или

$$\Psi = L \cdot I. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности L между силой тока в контуре I и полным магнитным потоком Ψ , пронизывающим этот контур, называется коэффициентом индуктивности, или *индуктивностью контура*.

Так, для соленоида $B_n = B = \mu \cdot \mu_0 \cdot n \cdot I$ и $\Psi = \mu \cdot \mu_0 \frac{N^2}{l} IS = \mu \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot V \cdot I$.

Тогда индуктивность длинного соленоида

$$L = \mu \cdot \mu_0 \frac{N^2}{l} S = \mu \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot V, \quad (3)$$

где μ – магнитная проницаемость среды; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; l , S , V – длина, площадь поперечного сечения и объем соленоида; n – число витков на единицу длины.

Индуктивность в общем случае зависит только от размеров и формы контура, числа витков и магнитной проницаемости среды, в которой находится контур. Если конфигурация контура не изменяется, а магнитная проницаемость среды μ не зависит от индукции магнитного поля, а следовательно, от силы тока в контуре, то $L = \text{const}$. Если внутри контура находится ферромагнитный сердечник, магнитная проницаемость μ которого зависит от индукции намагничи-

вающего поля, а следовательно, от силы тока в контуре, то индуктивность $L \neq \text{const}$ и также зависит от силы тока в контуре.

Единица индуктивности в СИ: $[L] = \text{Гн}$ – генри.

Согласно *закону Фарадея* (закону электромагнитной индукции), всякое изменение сцепленного с контуром магнитного потока вызывает возникновение в контуре ЭДС индукции, равной скорости изменения этого потока:

$$\varepsilon_{\text{и}} = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (4)$$

Знак « $-$ » в законе Фарадея определяется *правилом Ленца*: индукционный ток в контуре направлен так, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего этот индукционный ток.

При изменении силы тока в контуре изменяется пронизывающий контур магнитный поток. В результате в контуре возникает ЭДС *самоиндукции* $\varepsilon_{\text{с}}$. Согласно закону (4):

$$\varepsilon_{\text{с}} = -\frac{d\Psi}{dt} = -\left(L\frac{dI}{dt} + I\frac{dL}{dt}\right). \quad (5)$$

В отсутствие ферромагнетиков $L = \text{const}$ и $\frac{dL}{dt} = 0$, тогда

$$\varepsilon_{\text{с}} = -L\frac{dI}{dt}. \quad (6)$$

Изменение тока при замыкании и размыкании цепи, содержащей индуктивность

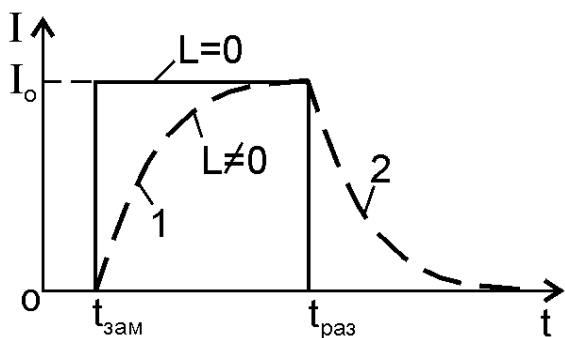


Рис. 1. Зависимость тока в цепи при замыкании и размыкании в зависимости от времени

При отсутствии индуктивности в цепи ток при замыкании и размыкании меняется практически мгновенно (рис. 1). Наличие в цепи индуктивности препятствует мгновенному нарастанию и убыванию тока, так как по правилу Ленца токи, возникающие вследствие самоиндукции, направлены так, чтобы противодействовать изменениям тока в цепи.

Рассмотрим цепь, изображенную на рис. 2. При переводе ключа К из положения 2 в положение 1 ток в цепи начинает убывать.

Тогда по второму правилу Кирхгофа

$$I \cdot R = \varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}.$$

Имеем дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными.

Разделив переменные, получаем

$$\frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt.$$

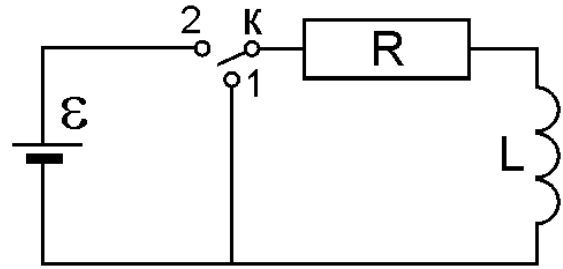


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Интегрируя обе части уравнения, имеем

$$\ln I = -\frac{R}{L}t + \ln C_1, \text{ откуда } I = C_1 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Из начальных условий при $t = 0$ (в момент размыкания) $I = I_0 = \varepsilon / R$ найдем величину $C_1 = I_0$.

Окончательно закон изменения тока при размыкании цепи принимает вид

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (7)$$

Кривая зависимости тока от времени при размыкании цепи показана пунктиром (кривая 2, см. рис. 1). Из формулы (7) следует, что чем больше индуктивность цепи, тем медленнее уменьшается ток в этой цепи, полностью исчезая за бесконечно большое время. Отсюда ясен физический смысл индуктивности: индуктивность цепи характеризует инертность цепи в электрических процессах.

Переведем ключ К в положение 2. Согласно второму правилу Кирхгофа, в этом случае

$$I \cdot R = \varepsilon - L \cdot \frac{dI}{dt}, \text{ откуда } I = \frac{\varepsilon}{R} - \left(\frac{L}{R}\right) \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Так как $\frac{\varepsilon}{R} = I_0$ – номинальное (установившееся) значение силы тока, то

$$I - I_0 = -\left(\frac{L}{R}\right) \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Так как $d(I - I_0) = dI$, то

$$I - I_0 = -\left(\frac{L}{R}\right) \cdot \frac{d(I - I_0)}{dt}, \text{ откуда } \frac{d(I - I_0)}{I - I_0} = -\frac{R}{L} dt.$$

Интегрируя обе части уравнения, имеем

$$\ln(I - I_0) = -\frac{R}{L}t + \ln C_2,$$

откуда после потенцирования получаем $I - I_0 = C_2 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$.

Из начальных условий при $t = 0$ (в момент замыкания) $I = 0$ найдем величину $C_2 = -I_0$, и тогда

$$I = I_0 \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}t}). \quad (8)$$

График изменения тока при замыкании цепи изображен пунктиром (кривая 1, см. рис. 1).

Из формул (7) и (8) следует, что длительность переходного процесса определяется отношением R/L , имеющим размерность c^{-1} . Обратная величина

$$\tau = \frac{L}{R}, \quad (9)$$

имеющая размерность времени, также характеризует длительность переходного процесса и называется временем релаксации или *постоянной времени* цепи.

Из формулы (7) видно, что *постоянная времени при размыкании цепи* τ_p равна времени, в течение которого сила тока уменьшается в e раз, т.е.

$$I_{\tau p} = I_0 \cdot e^{-1} \approx 0,37 \cdot I_0.$$

Постоянная времени при замыкании цепи τ_z , согласно формуле (8), равна времени, в течение которого сила тока достигает значения

$$I_{\tau z} = I_0 \cdot (1 - e^{-1}) \approx 0,63 \cdot I_0.$$

При $t = 3\tau$ ток при замыкании цепи достигает 95 % номинального значения, а при размыкании цепи ток не превышает 5 % номинального значения.

Если в результате эксперимента определить постоянную времени τ как время, в течение которого сила тока достигает значения I_τ , то при известном значении активного сопротивления цепи R можно рассчитать индуктивность цепи по формулам:

$$L = \tau_z \cdot R_z; \quad L = \tau_p \cdot R_p, \quad (10)$$

где R_z и R_p – сопротивления цепи при замыкании и размыкании.

Описание электрической схемы

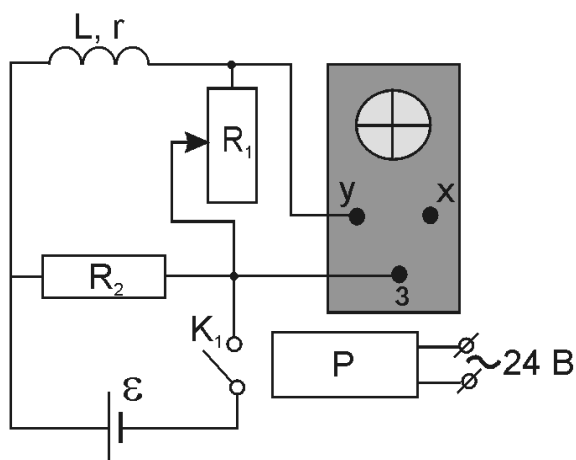


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Электрическая схема установки представлена на рис. 3. Источником постоянного напряжения является батарея ε . Явление самоиндукции возникает в катушке индуктивности L , имеющей собственное омическое сопротивление r . Магазин сопротивлений R_1 служит для изменения постоянной времени цепи при замыкании и размыкании. Резистор R_2 обеспечивает поддержание тока в цепи после размыкания K_1 .

Падение напряжения на магазине сопротивлений R_1 , пропорциональное току в цепи, подается на осциллограф для наблюдения изменения силы тока в

зависимости от времени. Для замыкания и размыкания цепи служит поляризационное реле Р, включающее цепь 50 раз в секунду (катушка реле Р питается от сети напряжением 24 В и частотой 50 Гц). Ключ K_1 является контактами реле.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с элементами электрической схемы и собрать электрическую цепь согласно рис. 3. Правильность сборки проверить в присутствии преподавателя или методиста.

2. Установить на магазине сопротивлений R_1 начальное сопротивление, указанное на панели магазина. Значения сопротивлений r , R_2 и всех указанных значений R_1 занести в таблицу.

3. Включить осциллограф и дать ему прогреться. Включить реле в сеть переменного напряжения 24 В. Ручкой регулировки частоты синхронизации добиться устойчивости картины на экране осциллографа.

4. Проверить правильность схемы, для чего временно отключить сопротивление R_2 . При этом должна исчезать часть осциллограммы, соответствующая процессу размыкания. Если это не так, поменять полярность батареи.

5. Ручками осциллографа «Усиление X », «Усиление Y », « $\leftrightarrow$ », « $\updownarrow$ » установить размер картины, удобный для выбора масштаба: $\Delta y = 50$ мм, $\Delta x = 100$ мм, как показано на рис. 4.

При работе с осциллографом С1-93 установить ручкой усиления только вертикальный размер $\Delta y = 50$ мм, так как на этом приборе изменить горизонтальный размер фигуры не представляется возможным. Для дальнейшего расчета цены деления по горизонтали величину Δx измерить по сетке осциллографа.

Величину Δx записать в таблицу.

6. Ручкой смещения луча по горизонтали « $\leftrightarrow$ » осциллографа установить картину изменения силы тока на экране осциллографа так, чтобы линия тока замыкания цепи пересекла ось « Y » в точке с координатой 31,5 мм, что при $\Delta y = 50$ мм соответствует току $I_{тз}$. Тогда отрезок Δt_3 , отсекаемый фигурой на оси « X » (рис. 5а), будет пропорционален постоянной времени τ_3 .

Измерить по сетке осциллографа величину Δt_3 и полученное значение записать в таблицу.

7. Ручками смещения луча по горизонтали и вертикали « $\leftrightarrow$ » « $\updownarrow$ » осциллографа установить картину изменения силы тока на экране осциллографа так, как показано на рис. 5б. Линия тока размыкания цепи в этом случае пересекает ось « Y » в точке с координатой 31,5 мм, что при $\Delta y = 50$ мм соответствует току $I_{тр}$. Отрезок Δt_p , отсекаемый фигурой на оси « X », будет пропорционален постоянной времени τ_p .

Измерить по сетке осциллографа величину Δt_p и полученное значение записать в таблицу.

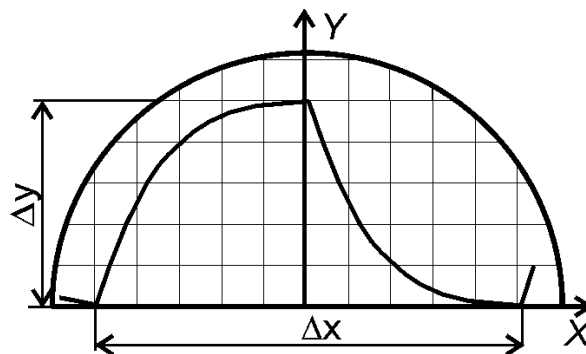


Рис. 4. Картина на экране осциллографа перед началом измерения постоянной времени

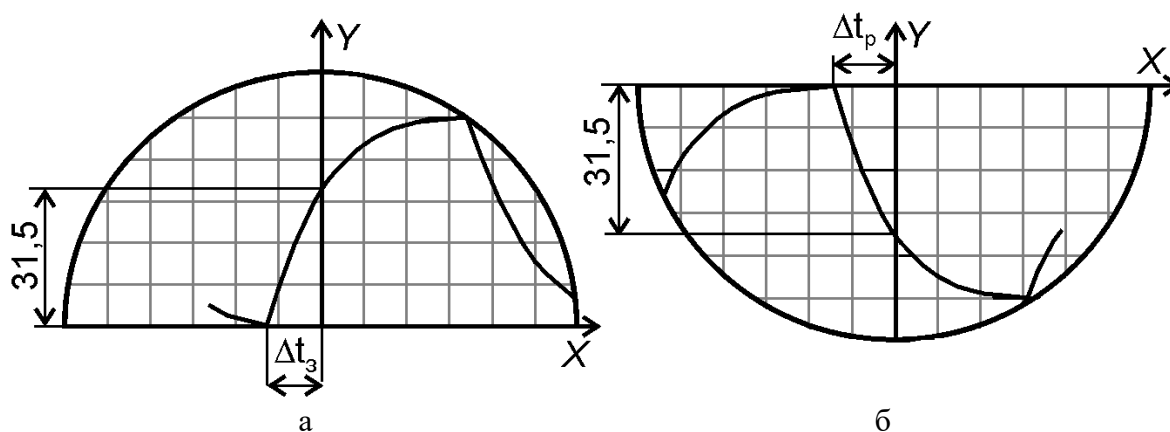


Рис. 5. Определение постоянной времени: а – замыкание; б – размыкание

Результаты эксперимента

$\Delta x = \dots \text{ мм,}$				$C_x = \dots \text{ с/мм}$					
№	$r, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_1, \text{ Ом}$	Процесс	$\Delta t, \text{ мм}$	$\tau, \text{ с}$	$L, \text{ Гн}$	ΔL_i	$(\Delta L_i)^2$
1				Замыкание					
2				Размыкание					
3				Замыкание					
4				Размыкание					
5				Замыкание					
6				Размыкание					
7				Замыкание					
8				Размыкание					
9				Замыкание					
10				Размыкание					

8. Установить на магазине сопротивлений R_1 второе значение сопротивления, указанное на панели магазина. Повторить измерения, выполнив по порядку пункты 5–7.

9. Измерить значения Δt_3 , Δt_p по пунктам 5–7 для всех указанных в таблице значений сопротивления R_1 .

Обработка результатов эксперимента

1. Учитывая, что длительность процесса возрастания и убывания тока в цепи $T = 0,02 \text{ с}$, рассчитать цену деления сетки осциллографа по горизонтали:

$$C_x = \frac{0,02}{\Delta x} \text{ с/мм.}$$

2. Рассчитать значения постоянных времени τ_3 и τ_p по формулам:

$$\tau_3 = C_x \cdot \Delta t_3; \quad \tau_p = C_x \cdot \Delta t_p.$$

3. По формулам (10) вычислить индуктивность цепи L , учитывая, что

$$R_3 = r + R_1; \quad R_p = r + R_1 + R_2.$$

4. Рассчитать среднее значение индуктивности $\langle L \rangle$, доверительный интервал Δ_L и относительную погрешность измерения E согласно прилож. 1.

Результаты работы

1. Записать значение коэффициента индуктивности цепи в виде:

$$L = \langle L \rangle \pm \Delta_L; \quad E = \dots \%$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление электромагнитной индукции? Приведите примеры.

2. Запишите закон Фарадея для электромагнитной индукции.

3. В чем состоит правило Ленца? Приведите примеры.

4. Чем отличается явление самоиндукции от явления электромагнитной индукции? Напишите выражение для ЭДС самоиндукции.

5. Что называется индуктивностью, от чего она зависит?

6. Выведите формулы, описывающие возрастание и уменьшение тока при замыкании и размыкании цепи.

7. Выведите теоретическую формулу для расчета индуктивности соленоида. От чего зависит индуктивность соленоида?

8. Что называется постоянной времени цепи?

9. Как определяется цена деления по оси времени на экране осциллографа?

10. Как определить постоянные времени τ_z и τ_p по графику изменения тока на экране осциллографа?

11. Как вычисляется в работе индуктивность катушки при замыкании и размыкании?

12. Изобразите вид графика зависимости тока от времени при замыкании цепи. На графике покажите постоянную времени цепи. Как изменится график при изменении индуктивности цепи и ее сопротивления?

13. Изобразите вид графика зависимости тока от времени при размыкании цепи. На графике покажите постоянную времени цепи. Как изменится график при изменении индуктивности цепи и ее сопротивления?

Дополнительная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. СПб.: Лань, 2022. §64, 65.

2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2016. §122, 126, 127.

Лабораторная работа № 3–5

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Цели работы: изучение магнитных свойств ферромагнетиков, получение кривой намагничивания ферромагнетика и петли гистерезиса с помощью осциллографа, определение магнитной проницаемости ферромагнетика.

Приборы и принадлежности: панель с ферромагнетиком (сердечник трансформатора) и интегрирующей цепочкой; осциллограф; реостат; вольтметр; набор проводов.

Магнитные свойства ферромагнетиков

Все вещества являются *магнетиками*, т.е. обладают определенными магнитными свойствами, поскольку всякое вещество способно под действием внешнего магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться). Это объясняется действием магнитного поля на микроскопические токи, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах вещества. Намагниченное вещество создает свое магнитное поле, которое вместе с внешним полем образует результирующее магнитное поле в веществе.

Относительная магнитная проницаемость показывает, во сколько раз изменяется магнитная индукция в веществе B по сравнению с магнитной индукцией внешнего намагничивающего поля в вакууме B_0 :

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \quad (1)$$

В зависимости от величины магнитной проницаемости различают три основных типа вещества: *диамагнетики*, *парамагнетики* и *ферромагнетики*. Для диамагнетиков $\mu < 1$, для парамагнетиков $\mu > 1$, причем как у тех, так и у других она очень мало отличается от единицы и не зависит от B_0 . Молекулы диамагнетиков не обладают собственным магнитным моментом, круговые микротоки индуцируются внешним магнитным полем. Диамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, направленное против внешнего поля и немного ослабляющее его. Этот эффект называется диамагнитным.

Молекулы парамагнетика обладают собственным магнитным моментом, однако вследствие теплового движения молекул их магнитные моменты ориентированы хаотически и компенсируют друг друга. При внесении парамагнетика в магнитное поле устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов по полю (полной ориентации препятствует тепловое движение). Таким образом, парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем. При этом наблюдается и универсальный диамагнитный эффект, но он слабее парамагнитного. В результате внешнее поле немного усиливается.

Ферромагнетики являются сильномагнитными веществами. У ферромагнетиков $\mu \gg 1$, причем для ферромагнетика характерна нелинейная зависимость B от индукции намагничивающего поля B_0 . Важной особенностью ферромагнетиков является также *магнитный гистерезис* – зависимость B не только

от B_0 , но и от предыстории намагничивания ферромагнетика. Особые магнитные свойства ферромагнетиков обусловлены доменной структурой их кристаллов. Ферромагнетик состоит из большого числа малых областей – *доменов*, самопроизвольно намагниченных до насыщения и обладающих собственным магнитным моментом. При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты доменов ориентированы хаотически и компенсируют друг друга, поэтому ферромагнетик не намагничен. В магнитном поле происходит сначала рост доменов, ориентированных в направлении внешнего поля, а затем скачкообразный поворот магнитных моментов доменов по направлению поля. Ферромагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и во много раз усиливающее его.

Зависимость индукции внутри ферромагнетика B от индукции намагничивающего поля B_0 (кривая намагничивания) имеет вид, изображенный на рис. 1 (кривая OA). При уменьшении внешнего поля кривая размагничивания ферромагнетика (кривая AK) не совпадает с кривой намагничивания (рис. 1). Даже при уменьшении внешнего поля до нуля внутри ферромагнетика остается некоторая преимущественная ориентация доменов. Эта ориентация является причиной *остаточной индукции* ферромагнетика (отрезок OK на рис. 1). Для того чтобы уничтожить остаточную индукцию, надо приложить внешнее поле с индукцией B_{0c} противоположного направления (отрезок OC на рис. 1). Перемагничивание ферромагнетика происходит по замкнутой кривой $AKCDEFA$ (см. рис. 1), которая называется *петлей гистерезиса*.

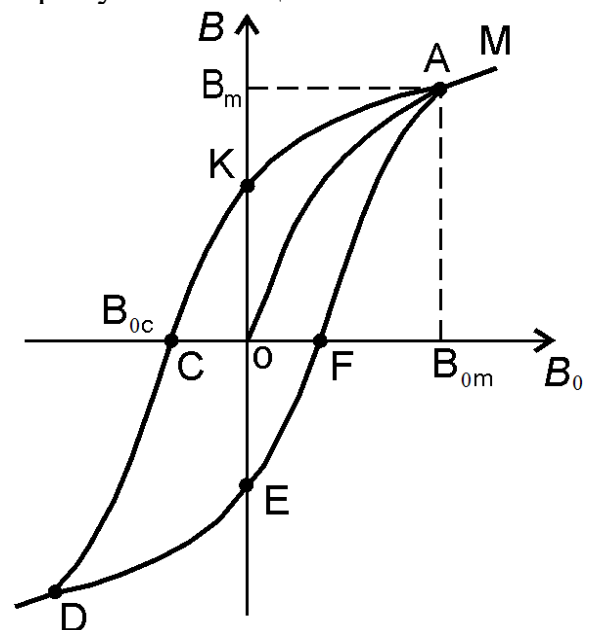


Рис. 1. Петля гистерезиса

Максимально возможная для данного ферромагнетика петля гистерезиса изображена на рис. 1. При увеличении индукции намагничивающего поля больше значения B_{0m} кривые намагничивания и размагничивания совпадают с линией AM . Точка A соответствует началу так называемого состояния *насыщения ферромагнетика*, когда все домены ориентированы в направлении внешнего поля. При $B_0 > B_{0m}$ индукция магнитного поля внутри ферромагнетика линейно растет только за счет увеличения индукции намагничивающего поля B_0 .

Перемагничивание ферромагнетика требует затрат энергии, которая выделяется в виде тепла. Чем больше площадь петли гистерезиса, тем больше работа перемагничивания. В зависимости от площади петли гистерезиса, а также от значений остаточной индукции различают разные классы ферромагнитных материалов. Так, постоянные магниты изготовлены из ферромагнетиков, имеющих большую площадь петли гистерезиса (*магнитно-жесткие материалы*).

В трансформаторах, напротив, применяются ферромагнитные сердечники, легко перемагничиваемые внешним магнитным полем, имеющие узкую

петлю гистерезиса (магнитно-мягкие материалы).

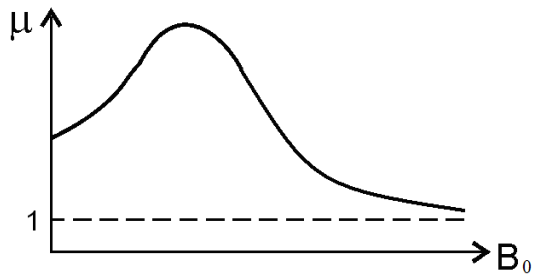


Рис. 2. Зависимость магнитной проницаемости от величины индукции намагничивающего поля

Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика μ от индукции намагничивающего поля B_0 имеет вид, изображенный на рис. 2. Магнитная проницаемость изменяется при увеличении B_0 по экстремальному закону, проходя через максимум. Максимальное значение этой величины $\mu_{\max}$ является одной из важнейших характеристик ферромагнетика. При насыщении ферромагнетика величина магнитной проницаемости μ стремится к единице.

Осциллографический метод исследования ферромагнетика

Большинство изделий из ферромагнетиков работает в переменных магнитных полях (сердечники трансформаторов, электродвигателей и т.п.). Такой режим работы ферромагнетиков называется динамическим. Изображение динамической петли гистерезиса можно получить на экране осциллографа. Для этого необходимо поместить ферромагнетик в магнитное поле переменного тока и на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подать напряжение U_x , пропорциональное индукции намагничивающего поля B_0 , а на вертикально отклоняющие пластины – напряжение U_y , пропорциональное индукции магнитного поля в ферромагнетике B . Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

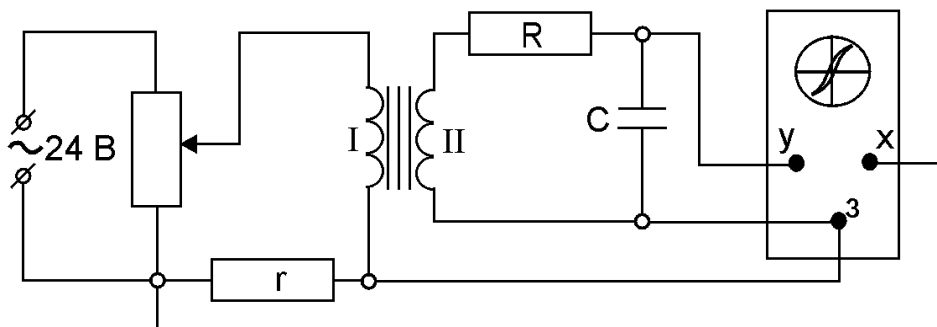


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Переменный ток в первичной обмотке трансформатора создает намагничивающее поле с индукцией

$$B_0 = \mu_0 n_1 I_1, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; n_1 – число витков на единицу длины первичной обмотки; I_1 – сила тока в обмотке. Падение напряжения на сопротивлении r пропорционально индукции намагничивающего поля:

$$U_x = r \cdot I_1 = \frac{r}{\mu_0 n_1} \cdot B_0. \quad (3)$$

Это напряжение подается на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа.

Во вторичной обмотке трансформатора возбуждается ЭДС индукции:

$$\varepsilon_{\text{и}} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \cdot S \cdot \frac{dB}{dt}, \quad (4)$$

где N_2 – общее число витков вторичной обмотки; S – площадь сечения сердечника трансформатора. Таким образом, напряжение во вторичной обмотке пропорционально производной dB/dt . Чтобы подать на вертикально отклоняющие пластины напряжение, пропорциональное индукции в ферромагнетике B , необходимо включить между вторичной обмоткой и входом «У» осциллографа интегрирующую цепочку. Интегрирование проще всего осуществить с помощью резистора и конденсатора (RC – ячейка) при условии $RC \gg T$, где T – период изменения ЭДС индукции.

Рассмотрим действие интегрирующей цепочки. По второму правилу Кирхгофа для цепи, включающей вторичную обмотку трансформатора, можно записать

$$\varepsilon_{\text{и}} = I_2 \cdot R + I_2 \cdot R_k + L \cdot \frac{dI_2}{dt} + U_c,$$

где I_2 , R_k и L – сила тока, сопротивление и индуктивность вторичной обмотки трансформатора; U_c – падение напряжения на конденсаторе.

Если величина R достаточно велика, так что $I_2 \cdot R \gg I_2 \cdot R_k + L \cdot \frac{dI_2}{dt} + U_c$,

то $\varepsilon_{\text{и}} \approx I_2 \cdot R$, откуда с учетом (4):

$$I_2 = \frac{\varepsilon_{\text{и}}}{R} = - \frac{N_2 \cdot S}{R} \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (5)$$

Напряжение на конденсаторе $U_c = U_y = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt$, где q – заряд на обкладках конденсатора.

Отсюда, подставляя I_2 из формулы (5) для напряжения на входе «У» осциллографа U_y , получим

$$U_y = \frac{N_2 \cdot S}{R \cdot C} \cdot B + \text{const}, \quad (6)$$

т.е. U_y пропорционально B .

Под действием напряжения на горизонтально и вертикально отклоняющих пластинах электронный луч на экране осциллографа будет описывать динамическую петлю гистерезиса. Меняя ток I_1 в первичной обмотке трансформатора, можно получить семейство петель гистерезиса. Верхняя точка каждой петли будет находиться на кривой намагничивания (см. рис. 1). Для построения кривой намагничивания необходимо измерить координаты X и Y вершин петель гистерезиса при различных значениях тока намагничивания и определить по ним величину напряжений U_x и U_y . Для этого предварительно следует опреде-

лить цену деления осциллографа по вертикали C_y и горизонтали C_x . По формулам (3) и (6) можно рассчитать значения B_0 и B :

$$B_0 = K_x \cdot X, \quad \text{где } K_x = \frac{\mu_0 \cdot n_1}{r} \cdot C_x; \quad (7)$$

$$B = K_y \cdot Y, \quad \text{где } K_y = \frac{R \cdot C}{N_2 \cdot S} \cdot C_y. \quad (8)$$

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис. 3. Правильность сборки проверить в присутствии преподавателя или методиста.

2. Подготовить осциллограф к работе: включить в сеть 220 В, прогреть 1...2 мин, вывести электронный луч в центр экрана.

3. Включить питание от сети переменного тока напряжением $U = 24$ В.

4. С помощью потенциометра установить такой ток намагничивания, чтобы петля гистерезиса имела малый участок насыщения AM . Ручками «Усиление Y », «Усиление X » установить размер петли гистерезиса так, чтобы точка A (см. рис. 1) имела максимальное значение координат $x_{\max} = 50$ мм и $y_{\max} = 50$ мм.

При работе с осциллографом С1-93 $y_{\max} = 40$ мм. При этом горизонтальный размер фигуры $x_{\max}$ устанавливается с помощью движка потенциометра.

Значения координат записать в табл. 1 и 2 (первая строка).

Таблица 1. Характеристики установки

n , вит/м	r , Ом	R , Ом	C , Ф	S , м ²	N_2 , вит.	$X_{\max}$, мм	$Y_{\max}$, мм	U_{xm} , В	U_{ym} , В	C_x , В/мм	C_y , В/мм

Таблица 2. Результаты эксперимента

№	x , мм	y , мм	B_0 , Тл	B , Тл	$\mu = B/B_0$
1					
2					
...					
10					

5. Измерить вольтметром значения напряжений U_{xm} и U_{ym} , подаваемых в этот момент на входы « X » и « Y » осциллографа. Значения напряжений записать в табл. 1.

6. Записать в табл. 1 характеристики установки, которые приведены на торцевой стороне панели.

7. Зарисовать вид петли гистерезиса при максимальных значениях координат $x_{\max}$ и $y_{\max}$ в масштабе.

8. Уменьшая с помощью потенциометра ток намагничивания I_1 , снять не менее 9 координат x и y точки A (см. рис. 1) и занести их значения в табл. 2.

Обработка результатов эксперимента

1. Вычислить и занести в табл. 1 цену деления осциллографа по входам «У» и «Х» по формулам:

$$C_x = \sqrt{2} \frac{U_{xm}}{x_{\max}}; \quad C_y = \sqrt{2} \frac{U_{ym}}{y_{\max}}.$$

2. Вычислить значения K_x и K_y в формулах (7) и (8).

3. Для каждой строки табл. 2 вычислить значения B_0 и B по формулам (7) и (8) и согласно определению рассчитать величину магнитной проницаемости материала сердечника μ по формуле (1).

4. По данным табл. 2 построить графики зависимостей $B = f(B_0)$ и $\mu = f(B_0)$.

Результаты работы

Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какова природа магнитных свойств веществ?
2. Что называется относительной магнитной проницаемостью? Как классифицируются магнетики по величине магнитной проницаемости?
3. Что такое вектор намагничивания (намагниченность)? Постройте и объясните графики зависимости вектора намагничивания от напряженности внешнего поля для всех известных классов магнетиков.
4. Как намагничивается диамагнетик во внешнем поле? Почему?
5. В чем сущность явления диамагнетизма?
6. Как намагничивается парамагнетик во внешнем поле? Почему?
7. Чем отличаются ферромагнетики от парамагнетиков? Что такое домены?
8. Изобразите кривую магнитного гистерезиса. Объясните ее вид.
9. Какие вещества называются магнитно-мягкими и магнитно-жесткими? Где их применяют?
10. Что такое коэрцитивная сила и остаточная намагниченность (индукция)? По вашим данным определите остаточную индукцию, коэрцитивную силу, индукцию насыщения.
11. Магнитные свойства каких магнетиков зависят от температуры? Объясните эти зависимости.

Дополнительная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. СПб.: Лань, 2022. §51, 53, 55, 59.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2016. §109, 131–136.

Лабораторная работа № 3–6 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Цели работы: изучение свободных затухающих и вынужденных колебаний в колебательном контуре, определение логарифмического декремента затухания; построение резонансных кривых.

Приборы и принадлежности: осциллограф, звуковой генератор, магазин сопротивлений, панель с колебательным контуром.

Свободные колебания

Свободные колебания возникают в электрических цепях, содержащих катушку индуктивностью L , конденсатор емкостью C и сопротивление R , соединенные последовательно (рис. 1). Такая цепь называется колебательным контуром. Если предварительно зарядить конденсатор от источника постоянной ЭДС (ключ в положении 1), а затем перевести ключ в положение 2, то конденсатор начнет разряжаться и в цепи потечет ток, создающий в катушке индуктивности ЭДС самоиндукции, которая препятствует нарастанию тока. Магнитное поле катушки растет, пока ток не достигнет максимума. При этом энергия электрического поля конденсатора, за исключением потерь на сопротивлении R , перейдет в энергию магнитного поля, а конденсатор разрядится. В этот момент ток начинает убывать и ЭДС самоиндукции меняет знак, поддерживая убывающий ток. Конденсатор перезарядается.

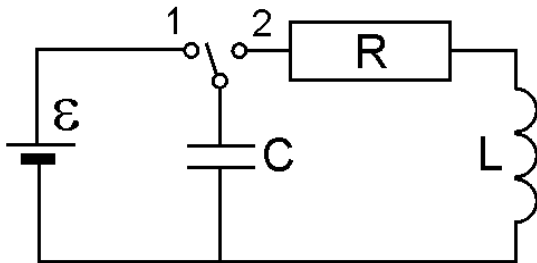


Рис. 1. Схема
колебательного контура
(затухающие колебания)

Процесс заканчивается, когда заряд конденсатора достигнет максимального значения. В этот момент энергия магнитного поля катушки, за исключением потерь на сопротивлении R , перейдет в энергию электрического поля конденсатора, а ток в цепи прекратится. Затем процесс повторяется в обратном порядке, в контуре возникают свободные колебания заряда, тока и напряжения на конденсаторе и индуктивности.

Пусть заряд на пластинах конденсатора в произвольный момент времени – q , напряжение на обкладках конденсатора – U_c , а ток в цепи – I . Согласно второму правилу Кирхгофа, в произвольный момент времени

$$I \cdot R + U_c = \varepsilon_c, \quad (1)$$

где ε_c – ЭДС самоиндукции.

Учитывая, что по определению сила тока $I = \frac{dq}{dt}$, ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_c = -L \cdot \frac{dI}{dt}, \text{ а напряжение на обкладках конденсатора } U_c = \frac{q}{C}, \text{ выражение (1)}$$

можно представить в виде

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

или

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

Полученное уравнение представляет собой дифференциальное уравнение затухающих колебаний, согласно которому на обкладках конденсатора происходит изменение заряда по закону

$$q = q_0 \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (3)$$

с амплитудой $q_a = q_0 \cdot e^{-\beta \cdot t}$, частотой $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ и начальной фазой φ_0 , где q_0 – начальный заряд конденсатора; $\beta = \frac{R}{2 \cdot L}$ – коэффициент затухания – величина, характеризующая быстроту затухания амплитуды колебаний с течением времени; $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$ – собственная частота контура – частота колебаний, возникавших бы в контуре при отсутствии сопротивления.

Из формулы (3) следует, что напряжение на пластинах конденсатора меняется по закону

$$U_c = \frac{q}{C} = U_{co} \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

где $U_{co} = \frac{q_0}{C}$ – амплитуда напряжения на обкладках конденсатора в начальный момент времени; $U_{ca} = U_{co} \cdot e^{-\beta \cdot t}$ – амплитуда напряжения на конденсаторе.

Изменение напряжения на конденсаторе U_c со временем приведено на рис. 2 (сплошная линия). Здесь же пунктиром показана зависимость амплитуды напряжения от времени.

Быстрота затухания колебаний характеризуется *логарифмическим декрементом затухания* λ – величиной, представляющей собой логарифм отношения двух последовательных амплитуд:

$$\lambda = \ln \frac{U_{ca}(t)}{U_{ca}(t+T)}.$$

Из определения логарифмического декремента затухания вытекает его связь с коэффициентом затухания в виде

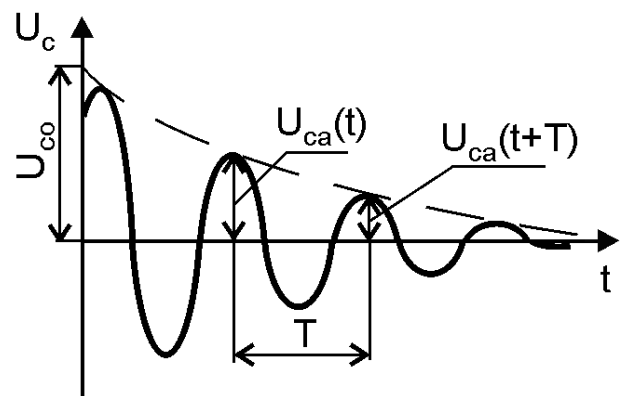


Рис. 2. Зависимость напряжения на конденсаторе U_c от времени t

$$\lambda = \beta \cdot T = \frac{\pi \cdot R}{L \cdot \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2 \cdot L}\right)^2}}.$$

Тогда уменьшение амплитуды напряжения на конденсаторе в зависимости от числа колебаний можно представить в виде

$$U_{ca} = U_{co} \cdot e^{-\beta \cdot N},$$

где N – число колебаний.

В электротехнике и радиотехнике для характеристики качества контура используется понятие *добротности контура*:

$$Q = \frac{\pi}{\lambda}.$$

Очевидно, чем выше добротность контура Q , тем меньше λ и тем медленнее затухают колебания.

При малом затухании ($\beta \ll \omega_0$) частота $\omega \approx \omega_0$, тогда

$$\lambda \approx \pi \cdot R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad \text{и} \quad Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Вынужденные колебания. Резонанс

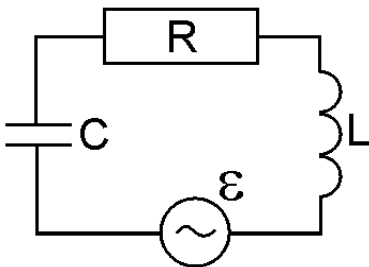


Рис. 3. Схема колебательного контура (вынужденные колебания)

Для того чтобы колебания не затухали, необходимо восполнять потери энергии в колебательном контуре на активном сопротивлении. Для этого в цепь (рис. 3) включается источник переменной ЭДС, которая называется вынуждающей. В простейшем случае эта ЭДС меняется по гармоническому закону:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos \Omega t,$$

где ε_0 и Ω – амплитуда и частота вынуждающей ЭДС.

В этом случае по второму правилу Кирхгофа

$$I \cdot R + U_c = \varepsilon_c + \varepsilon_0 \cdot \cos \omega \cdot t, \quad (5)$$

или с учетом ранее принятых обозначений

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = \frac{\varepsilon_0}{L} \cos \Omega \cdot t. \quad (6)$$

Согласно полученному дифференциальному уравнению, изменение

заряда на обкладках конденсатора происходит по закону

$$q = q_m \cdot \cos (\omega \cdot t - \Psi) \quad (7)$$

с частотой Ω , равной частоте вынуждающей ЭДС, амплитудой

$$q_m = \frac{\varepsilon_0}{L \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}} \quad (8)$$

и начальной фазой

$$\Psi = \arctg \frac{2\beta \Omega}{(\omega_0^2 - \Omega^2)}, \quad (9)$$

представляющей собой разность фаз между колебаниями ЭДС и заряда.

Напряжение на пластинах конденсатора меняется по закону

$$U_c = U_{cm} \cdot \cos (\Omega \cdot t - \Psi) \quad (10)$$

с амплитудой

$$U_{cm} = \frac{\varepsilon_0}{LC \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}}, \quad (11)$$

с частотой Ω , равной частоте вынуждающей ЭДС и начальной фазой, равной начальной фазе колебания заряда.

Векторная диаграмма напряжений на элементах колебательного контура, иллюстрирующая выражение (5), приведена на рис. 4. Как видно из диаграммы, напряжение на резисторе опережает по фазе напряжение на конденсаторе на $\pi/2$, а напряжения на катушке и конденсаторе находятся в противофазе.

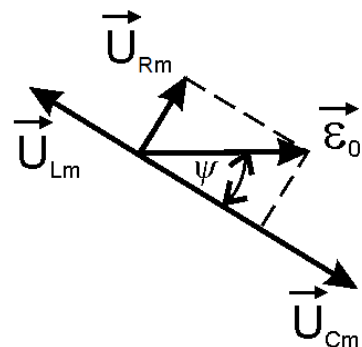


Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений

График зависимости амплитуды напряжения на конденсаторе от частоты вынуждающей ЭДС при различных значениях коэффициента затухания представлен на рис. 5. Как следует из приведенных кривых, при некоторой частоте ЭДС ε_p происходит резкое увеличение амплитуды напряжения. Это явление получило название *резонанса*. Частота Ω_p , при которой амплитуда напряжений достигает максимального значения, называется *резонансной частотой*, а изображенные на рис. 5 кривые – *резонансными кривыми*.

Из формулы (8) следует, что резонансная частота

$$\Omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2},$$

а максимальное значение амплитуды напряжения

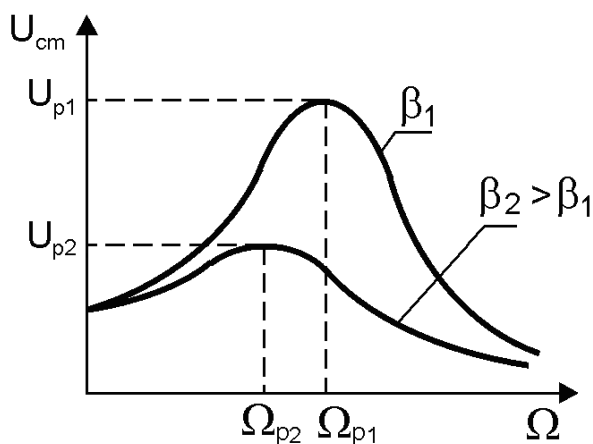


Рис. 5. Резонансные кривые

$$U_p = \frac{\varepsilon_0}{RC\sqrt{(\omega_0^2 - \beta^2)}}.$$

При $\Omega = \Omega_p$ начальная фаза

$$\Psi_p = \arctg \frac{\sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}}{\beta}.$$

Если затухание мало (т.е. $\beta \ll \omega_0$, что обычно соответствует реальным ко-

лебательным контурам), то при $\Omega = \Omega_p \approx \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$, максимальная амплитуда

напряжения на конденсаторе $U_p \approx \frac{\varepsilon_0}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \approx Q \cdot \varepsilon_0$, а начальная фаза $\Psi_p = \arctg Q$.

Из полученных выражений следует, что *добротность контура* есть величина, показывающая во сколько раз максимальная амплитуда напряжения на конденсаторе больше амплитуды вынуждающей ЭДС.

Следует отметить, что чем выше добротность контура, тем острее резонансная кривая и больше резонансное напряжение на конденсаторе. При хорошей добротности контура $Q > 100$ напряжение на конденсаторе при резонансной частоте отстает по фазе от вынуждающей ЭДС на $\pi/2$. При этом амплитуда напряжений на активном сопротивлении равна амплитуде вынуждающей ЭДС, а амплитуда напряжений на конденсаторе равна амплитуде напряжений на индуктивности.

Векторная диаграмма напряжений при резонансной частоте в случае малого затухания приведена на рис. 6.

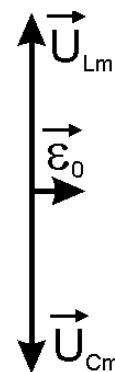


Рис. 6. Векторная диаграмма напряжений при резонансной частоте

Описание установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 7. Элементы колебательного контура — катушка индуктивности L с ферромагнитным сердечником, конденсатор C и катушка связи L_c , обведенные на схеме пунктиром, смонтированы на отдельной панели. Магазин сопротивлений R , подключаемый к клеммам 3 и 4 панели, служит для изменения сопротивления контура. Для наблюдения за напряжением на обкладках конденсатора при затухающих и вынужденных колебаниях применяется осциллограф, подключаемый к клеммам 4 и 5 панели.

При наблюдении затухающих колебаний в контуре (первое упражнение) он питается пилообразным напряжением от генератора развертки, которое подается с одного из гнезд «Вход X» на задней панели осциллографа на клемму 5 панели (рис. 7). При этом звуковой генератор (ЗГ) отключен.

Вынуждающая ЭДС подается в контур (второе упражнение) от звукового генератора, который подключается к катушке связи L_c через клеммы 1 и 2 панели. При этом провод, соединяющий генератор развертки с контуром, необходимо отсоединить от клеммы 5 панели.

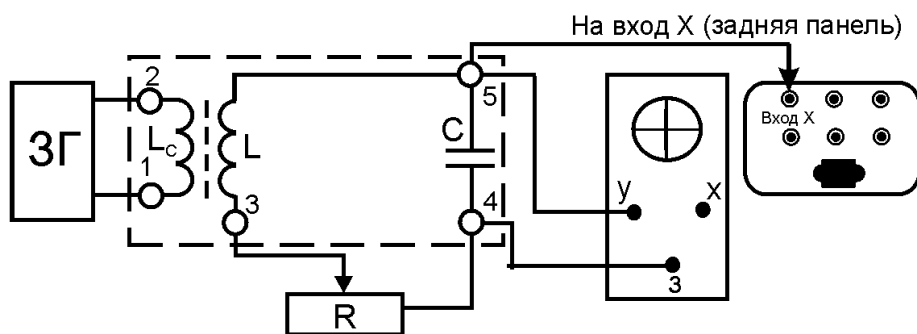


Рис. 7. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Изучение затухающих колебаний

1. Согласно схеме (см. рис. 7) подключить к панели с элементами колебательного контура магазин сопротивлений и осциллограф. С помощью провода со штекером соединить одно из гнезд «Вход X» на задней панели осциллографа с клеммой 5. Установить на магазине сопротивлений сопротивление R_1 порядка 1...5 Ом.

2. Включить осциллограф в сеть и дать ему прогреться. Ручками « $\leftrightarrow$ », « $\updownarrow$ » вывести осциллограмму в центр экрана. Переключателем «Диапазоны» выбрать частоту развертки таким образом, чтобы на экране осциллографа наблюдалось не менее десяти периодов собственных колебаний. Ручками «Усиление Y» и «Усиление X» установить удобные размеры изображения.

3. По шкале осциллографа измерить одиннадцать значений последовательно убывающих амплитуд напряжения на конденсаторе U_{ca} и записать полученные значения в табл. 1.

4. Отсоединить провод со штекером от клеммы 5 и вынуть штекер из гнезда «Вход X» на задней панели осциллографа.

Таблица 1. Результаты упражнения 1

№	$U_{ca}, \text{ мм}$	$\lambda_i = \ln \frac{U_{ca(i)}}{U_{ca(i+1)}}$	$\Delta \lambda_i$	$(\Delta \lambda_i)^2$
1				
2				
...				
10				
11				

Упражнение 2. Изучение вынужденных колебаний

1. Подключить к клеммам 1 и 2 катушки связи ЗГ. Переключатель «Диапазоны» на осциллографе перевести в положение «0». На экране осциллографа возникнет вертикальная прямая, размер которой d пропорционален удвоенной амплитуде напряжения на конденсаторе. Ручками « $\leftrightarrow$ », « $\updownarrow$ » вывести осциллограмму в центр экрана.

2. Изменяя частоту ЗГ (грубо – переключателем диапазонов и точно – вращая штурвал ЗГ) и наблюдая за изменением размера отрезка на экране осциллографа, найти частоту ν_p вынуждающей ЭДС, при которой амплитуда напряжения на конденсаторе достигает максимума. Значение резонансной частоты ν_p и величину установленного на магазине сопротивлений сопротивления R_1 записать в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Результаты упражнения 2

Увеличение частоты ЗГ				Уменьшение частоты ЗГ			
№	Частота ЗГ ν , Гц	Амплитуда A , мм		№	Частота ЗГ ν , Гц	Амплитуда A , мм	
		$R_1 = \dots$ Ом	$R_2 = \dots$ Ом			$R_1 = \dots$ Ом	$R_2 = \dots$ Ом
1				1			
2				2			
...				...			
10				10			

Таблица 3. Характеристики контура

C , мкФ	L , мГн	R_1 , Ом	$\langle \lambda \rangle$	ν_p , Гц	T , с	$r_{вн}$, Ом

3. Установить на ЗГ частоту $\nu_1 = \nu_p$. Ручками осциллографа «Усиление U » и « $\leftrightarrow$ », « $\updownarrow$ » увеличить размер d осциллограммы до 100 мм и установить ее в центре экрана симметрично оси « X ». Значения частоты ν_1 и амплитуды $A_1 = d/2$ записать в табл. 2.

4. Меняя не менее 10 раз частоту ЗГ ν с шагом $\Delta\nu = 100$ Гц в сторону увеличения от значения ν_1 , снять зависимость амплитуды вынужденных колебаний напряжения на конденсаторе от частоты вынуждающей ЭДС, записывая в табл. 2 значения амплитуды A_i , соответствующие каждой частоте ν_i .

5. Меняя не менее 10 раз частоту ЗГ ν с шагом $\Delta\nu = 100$ Гц в сторону уменьшения от значения ν_1 , записать в табл. 2 значения амплитуды A_i , соответствующие каждой частоте ν_i .

6. Установить на ЗГ частоту $\nu_1 = \nu_p$. На магазине сопротивлений установить сопротивление R_2 порядка 10...20 Ом так, чтобы вертикальный размер осциллограммы уменьшился на 30...40 %.

7. Последовательно устанавливая на ЗГ частоты ν_i согласно соответствующему столбцу табл. 2, записать в нее получающиеся значения амплитуды A_i вынужденных колебаний напряжения на конденсаторе при сопротивлении контура R_2 .

8. Значения характеристик контура C , L и сопротивления R_1 записать в табл. 3.

Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 1 рассчитать логарифмический декремент затухания λ_i .

2. Рассчитать среднее значение логарифмического декремента $\langle \lambda \rangle$, доверительный интервал $\Delta\lambda$ и относительную погрешность измерения E согласно прилож. 1.

Величину $\langle \lambda \rangle$ занести в табл. 3.

3. Полагая, что резонансная частота не отличается от собственной, считать период собственных колебаний $T = 1/\nu_p$. Величину T занести в табл. 3.

4. Рассчитать и занести в табл. 3 собственное сопротивление контура

$$r_{\text{вн}} = \frac{2 \cdot L}{T} \lambda - R_1.$$

5. По данным табл. 2 построить в одной системе координат две резонансные кривые $A = f(\nu)$ для сопротивлений контура R_1 и R_2 .

Результаты работы

1. Записать значение логарифмического декремента затухания в виде:

$$\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \Delta_\lambda; \quad E = \dots \%$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как возникают свободные колебания в контуре? Каков их характер?

2. Запишите уравнения собственных колебаний (незатухающих и затухающих) в дифференциальной форме и их решения.

3. Изобразите графики: а) зависимости напряжения на конденсаторе от времени; б) зависимости амплитуды напряжения от времени при затухающих колебаниях.

4. Что называется логарифмическим декрементом затухания? От каких величин зависит быстрота затухания колебаний в контуре?

5. Что такое добротность контура? Каков физический смысл этой величины? От каких величин она зависит?

6. Как возникают вынужденные колебания в контуре? Запишите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение.

7. От каких величин зависит частота собственных колебаний, вынужденных колебаний?

8. От чего зависят амплитуда, частота и фаза напряжения на конденсаторе при вынужденных колебаниях?

9. Что называется резонансной кривой? Как влияет сопротивление, индуктивность и емкость контура на форму резонансной кривой?

10. Постройте векторную диаграмму напряжений при вынужденных колебаниях. Какой вид приобретает эта диаграмма при резонансе?

Дополнительная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. СПб.: Лань, 2022. §89–91.

2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2016. §143, 146–148.

Лабораторная работа № 3-6(М) ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Цели работы: изучение свободных затухающих и вынужденных колебаний в колебательном контуре, определение логарифмического декремента затухания, построение резонансных кривых.

Приборы и принадлежности: осциллограф, звуковой генератор, магазин сопротивлений, панель с колебательным контуром.

Свободные колебания

Свободные электрические колебания возникают в замкнутой электрической цепи, содержащей катушку индуктивности и конденсатор, соединенные последовательно. Такая цепь называется *колебательным контуром*. Любая реальная электрическая цепь обладает также активным сопротивлением. Электрическая схема колебательного контура изображена на рис. 1, где L – индуктивность катушки; C – емкость конденсатора; R – эквивалентное активное сопротивление всех элементов цепи. Если предварительно зарядить конденсатор от источника с постоянной ЭДС (ключ в положении 1), а затем перевести ключ в положение 2, то конденсатор начнет разряжаться и в цепи возникнет нарастающий электрический ток, создающий в катушке индуктивности ЭДС самоиндукции, которая по правилу Ленца препятствует нарастанию тока. Индукция магнитного поля в катушке также возрастает, пока не достигнет максимума. При этом энергия электрического поля конденсатора, за исключением потерь на активном сопротивлении R , перейдет в энергию магнитного поля, а конденсатор разрядится, однако электрический ток в контуре не исчезает благодаря ЭДС самоиндукции, которая поддерживает убывающий ток. В результате конденсатор перезаряжается (заряды пластин меняют знак на противоположный).

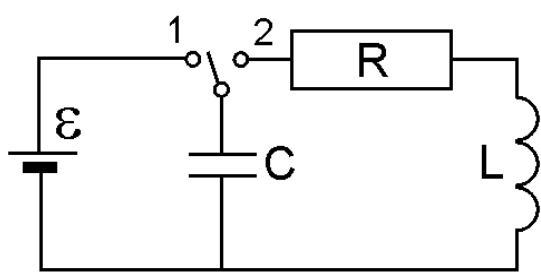


Рис. 1. Схема колебательного контура (затухающие колебания)

В этот момент энергия магнитного поля катушки, за исключением потерь на активном сопротивлении R , перейдет в энергию электрического поля конденсатора. Затем процесс повторяется в обратном порядке, в контуре возникают свободные колебания заряда, тока, напряжения, энергии электрического и магнитного полей.

Обозначим заряд на пластинах конденсатора в произвольный момент времени q , напряжение на обкладках конденсатора U_c , а ток в цепи I . Согласно второму правилу Кирхгофа, в произвольный момент времени

$$I \cdot R + U_c = \varepsilon_c, \quad (1)$$

где ε_c – ЭДС самоиндукции.

Учитывая, что по определению сила тока $I = \frac{dq}{dt}$, ЭДС самоиндукции $\varepsilon_c = -L \cdot \frac{dI}{dt}$, а напряжение на обкладках конденсатора $U_c = \frac{q}{C}$, выражение (1) можно представить в виде

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

или

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

Полученное уравнение является дифференциальным уравнением затухающих колебаний, согласно которому на обкладках конденсатора происходит изменение заряда по закону

$$q = q_0 \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (3)$$

с убывающей амплитудой $q_a = q_0 \cdot e^{-\beta \cdot t}$, частотой $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ и начальной фазой φ_0 , где q_0 – начальный заряд конденсатора; $\beta = \frac{R}{2 \cdot L}$ – коэффициент затухания – величина, характеризующая быстроту затухания амплитуды колебаний с течением времени; $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$ – собственная частота контура (частота колебаний в контуре при отсутствии активного сопротивления).

Из формулы (3) следует, что напряжение на пластинах конденсатора меняется по закону

$$U_c = \frac{q}{C} = U_{co} \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

где $U_{co} = \frac{q_0}{C}$ – амплитуда напряжения на обкладках конденсатора в начальный момент времени; $U_{ca} = U_{co} \cdot e^{-\beta \cdot t}$ – амплитуда напряжения на конденсаторе.

Изменение напряжения на конденсаторе U_c со временем изображено на рис. 2 (сплошная линия). Здесь же пунктиром показана зависимость амплитуды напряжения U_{ca} от времени.

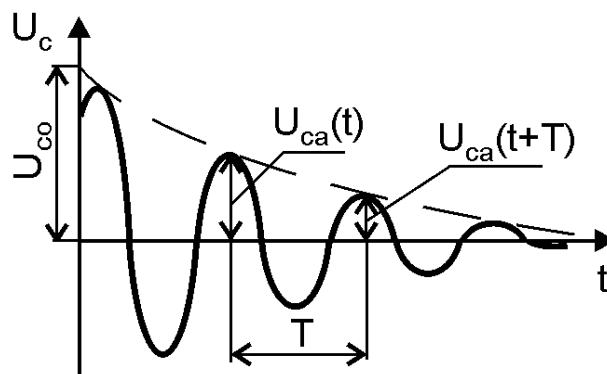


Рис. 2. Зависимость напряжения на конденсаторе U_c от времени t

Быстрота затухания колебаний характеризуется *логарифмическим декрементом затухания* λ – величиной, представляющей собой логарифм отношения двух последовательных амплитуд:

$$\lambda = \ln \frac{U_{ca}(t)}{U_{ca}(t+T)}.$$

Из определения логарифмического декремента затухания вытекает его связь с коэффициентом затухания в виде

$$\lambda = \beta \cdot T = \frac{\pi \cdot R}{L \cdot \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2 \cdot L}\right)^2}}.$$

Уменьшение амплитуды напряжения на конденсаторе в зависимости от числа колебаний можно представить как

$$U_{ca} = U_{co} \cdot e^{-\beta \cdot N},$$

где $N = t / T$ – число колебаний.

В электротехнике и радиотехнике для характеристики качества контура используется понятие *добротности контура*:

$$Q = \frac{\pi}{\lambda}.$$

Очевидно, чем выше добротность контура Q , тем меньше λ и тем медленнее затухают колебания.

При малом затухании ($\beta \ll \omega_0$) частота $\omega \approx \omega_0$, тогда

$$\lambda \approx \pi \cdot R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad \text{и} \quad Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Вынужденные колебания. Резонанс

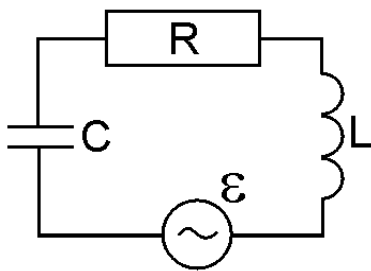


Рис. 3. Схема колебательного контура (вынужденные колебания)

Для того чтобы колебания не затухали, необходимо восполнять потери энергии в колебательном контуре на активном сопротивлении. Для этого в цепь (рис. 3) включается источник питания с переменной ЭДС, которая называется вынуждающей. Далее рассмотрим колебательный контур с ЭДС, меняющейся по гармоническому закону:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos \Omega t,$$

где ε_0 и Ω – амплитуда и частота вынуждающей ЭДС.

В этом случае по второму правилу Кирхгофа

$$I \cdot R + U_c = \varepsilon_c + \varepsilon_0 \cdot \cos \Omega \cdot t, \quad (5)$$

или с учетом ранее принятых обозначений

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = \frac{\varepsilon_0}{L} \cos \Omega \cdot t. \quad (6)$$

Согласно решению дифференциального уравнения (6), изменение заряда на обкладках конденсатора происходит по закону

$$q = q_m \cdot \cos (\Omega \cdot t - \Psi) \quad (7)$$

с частотой Ω , равной частоте вынуждающей ЭДС, амплитудой

$$q_m = \frac{\varepsilon_0}{L \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}} \quad (8)$$

и начальной фазой

$$\Psi = \arctg \frac{2\beta \Omega}{(\omega_0^2 - \Omega^2)}, \quad (9)$$

представляющей собой разность фаз между колебаниями заряда конденсатора и вынуждающей ЭДС.

Напряжение на пластинах конденсатора меняется по закону

$$U_c = U_{cm} \cdot \cos (\Omega \cdot t - \Psi) \quad (10)$$

с амплитудой

$$U_{cm} = \frac{\varepsilon_0}{LC \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}}, \quad (11)$$

с частотой Ω , равной частоте вынуждающей ЭДС, и начальной фазой, равной начальной фазе колебания заряда.

Векторная диаграмма напряжений на элементах колебательного контура, иллюстрирующая выражение (5), приведена на рис. 4. Как видно из диаграммы, напряжение на резисторе опережает по фазе напряжение на конденсаторе на $\pi/2$, а напряжения на катушке и конденсаторе находятся в противофазах.

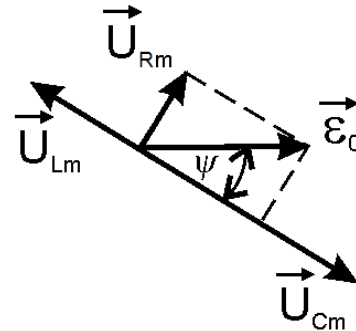


Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений

График зависимости амплитуды напряжения на конденсаторе от частоты вынуждающей ЭДС при различных значениях коэффициента затухания представлен на рис. 5. Как следует из приведенных кривых, при некоторой частоте ЭДС Ω_p происходит резкое увеличение амплитуды напряжения. Это явление получило название *резонанса*. Частота Ω_p , при которой амплитуда напряжений достигает максимального значения, называется *резонансной частотой*, а изображенные на рис. 5 кривые — *резонансными кривыми*.

Из формулы (8) следует, что резонансная частота

$$\Omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2},$$

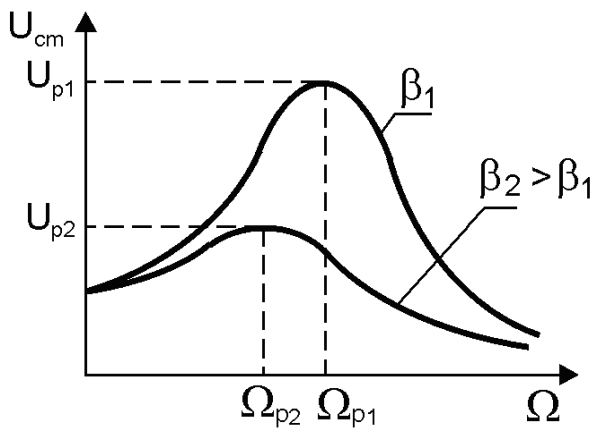


Рис. 5. Резонансные кривые

а максимальное значение амплитуды напряжения

$$U_p = \frac{\varepsilon_0}{RC\sqrt{(\omega_0^2 - \beta^2)}}.$$

При $\Omega = \Omega_p$ начальная фаза

$$\Psi_p = \arctg \frac{\sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}}{\beta}.$$

Если затухание мало (т.е. $\beta \ll \omega_0$, что обычно соответствует реальным

колебательным контурам), то при $\Omega = \Omega_p \approx \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$, максимальная амплитуда

напряжения на конденсаторе $U_p \approx \frac{\varepsilon_0}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \approx Q \cdot \varepsilon_0$, а начальная фаза $\Psi_p = \arctg Q$.

Из полученных выражений следует, что *добротность контура* есть величина, показывающая во сколько раз амплитуда напряжения на конденсаторе при резонансе больше амплитуды вынуждающей ЭДС.

Следует отметить, что чем выше добротность контура, тем острее резонансная кривая и больше резонансное напряжение на конденсаторе. При хорошей добротности контура $Q > 100$ напряжение на конденсаторе при резонансной частоте отстает по фазе от вынуждающей ЭДС на $\pi/2$. При этом амплитуда напряжений на активном сопротивлении равна амплитуде вынуждающей ЭДС, а амплитуда напряжений на конденсаторе равна амплитуде напряжений на индуктивности.

Векторная диаграмма напряжений при резонансной частоте в случае малого затухания приведена на рис. 6.

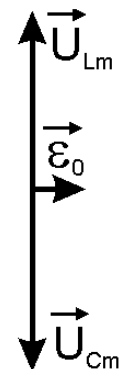


Рис. 6. Векторная диаграмма напряжений при резонансной частоте

Описание установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 7. Элементы колебательного контура – катушка индуктивности L с ферромагнитным сердечником, конденсатор C и катушка связи L_c , обведенные на схеме пунктиром, смонтированы на отдельной панели. Магазин сопротивлений R , подключаемый к клеммам 3 и 4 панели, служит для изменения сопротивления контура. Для наблюдения за напряжением на обкладках конденсатора при затухающих и вынужденных колебаниях применяется осциллограф С1-93, подключаемый к клеммам 4 и 5 панели.

Затухающие колебания в контуре (первое упражнение) возбуждаются встроенным в осциллограф генератором прямоугольных импульсов, выходное гнездо которого «Л 50 Гц» расположено на боковой панели осциллографа (рис. 7). Периодический сигнал прямоугольной формы подается с гнезда «Л 50 Гц»

на клемму 5 панели. Включение/выключение генератора прямоугольных импульсов осуществляется с помощью тумблера «Л 50 Гц», находящегося на задней панели осциллографа. При этом ЗГ выключен.

При изучении вынужденных колебаний (второе упражнение) вынуждающая ЭДС подается в контур от звукового генератора, который подключается к катушке связи L_c через клеммы 1 и 2 панели. При этом генератор прямоугольных импульсов необходимо выключить тумблером «Л 50 Гц», находящимся на задней панели осциллографа.

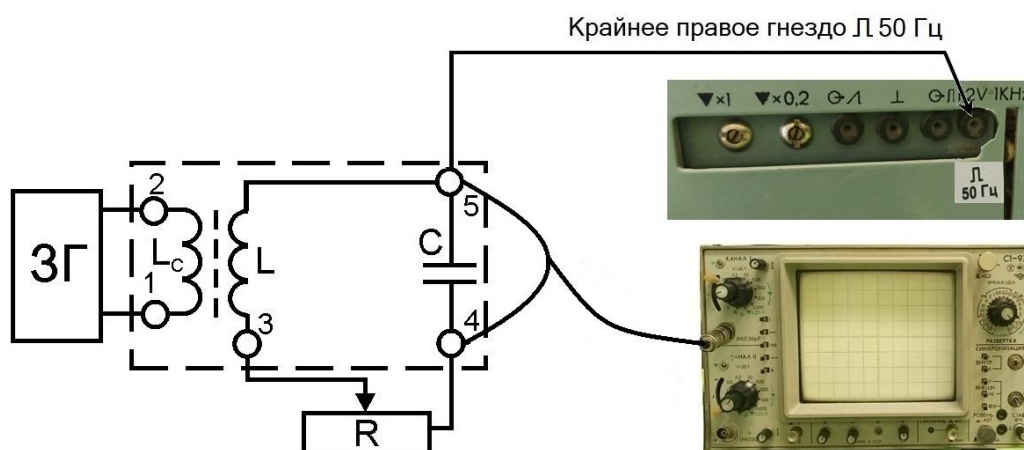


Рис. 7. Схема экспериментальной установки

Описание органов управления осциллографа

Расположение органов управления на передней панели осциллографа приведено на рис. 8.

- 1 – выдвижной переключатель «ПИТАНИЕ»;
- 2 – ручка регулировки яркости изображения;
- 3 – ручка фокусировки луча;
- 4 – ручка для включения/выключения подсветки линий шкалы на экране;
- 5 – гнездо «1MΩ30pF» подачи исследуемого сигнала на канал I;
- 6 – пять кнопок для выбора режима работы осциллографа:
кнопки «I» или «II» включают соответственно только канал I или только канал II;
- кнопки «I ± II», «...» и «→→» – в данной лабораторной работе (ЛР) не используются;
- 7 – переключатель режима работы входов осциллографа:
положение «~» – на вход осциллографа поступает только переменная составляющая исследуемого сигнала (используется в данной ЛР);
положения «⊥» и «↔» – в данной ЛР не используются;
- 8 – ступенчатый переключатель «V/ДЕЛ» (с ручкой плавной регулировки, расположенной на одной с ним оси) позволяет изменять размер изображения по вертикали;
- 9 – ручка «↑↓» для перемещения луча канала I по вертикали;
- 10 – кнопки «ВНУТР» «I» или «II» для синхронизации развертки и сигнала I или II канала;

11 – ступенчатый переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛ» (с ручкой плавной регулировки, расположенной на одной с ним оси) позволяет изменять частоту генератора развертки;

12 – выдвижной переключатель « $\leftrightarrow$ » для перемещения луча по горизонтали. Положения « $\times 1$ » и « $\times 0,2$ » устанавливают скорость перемещения луча.

13 – выдвижной переключатель фазы сигнала;

14 – тумблер-переключатель выбора синхронизирующего сигнала « $\sim$ »/« $\sim$ » с постоянной составляющей / без постоянной составляющей;

15 – тумблер-переключатель выбора уровня синхронизации « ∞ »/« ∞ » автоматически/вручную;

16 – кнопки «ВНЕШН» «1:1»/«1:10» для выбора синхронизирующего сигнала без ослабления / с ослаблением в 10 раз;

17 – кнопка « $\odot$ X» внешней синхронизации;

18 – выдвижной переключатель «УРОВЕНЬ» для выбора уровня синхронизации (положение «АВТ»). В положении ручного регулирования «ЖДУЩ» поворот переключателя по/против часовой стрелки позволяет добиться устойчивого изображения на экране;

19 – ручка «СТАБ ВЧ».

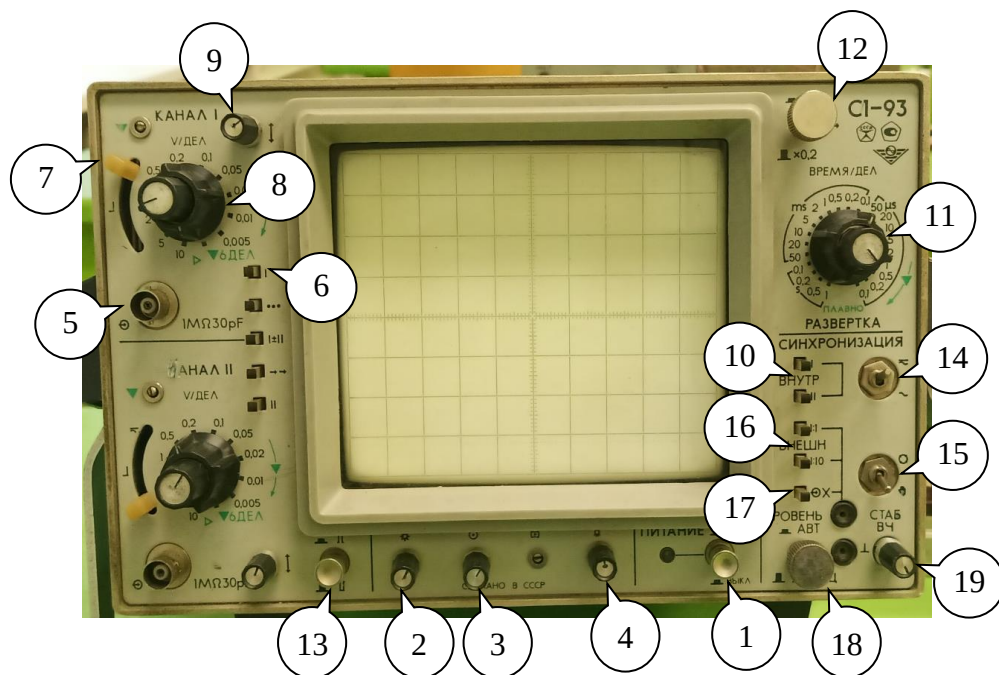


Рис. 8. Изображение передней панели осциллографа C1-93

Порядок выполнения работы

Подготовить экспериментальную установку для исследования затухающих и вынужденных колебаний.

1. Согласно схеме (см. рис. 7) подключить к панели с элементами колебательного контура магазин сопротивлений – к клеммам 3 и 4; осциллограф – к клеммам 4 и 5; 3Г – к клеммам 1 и 2.

2. Включить осциллограф и 3Г в сеть 220 В.

Упражнение 1. Изучение затухающих колебаний

Задание: определить логарифмический декремент затухания колебательного контура.

1. Подготовить осциллограф к измерениям. При подключении панели с элементами колебательного контура к каналу I осциллографа (см. рис. 8):

нажать кнопку 6;

нажать кнопку 10 «ВНУТР» «I»;

использовать гнездо 5, органы управления 7, 8 и 9, расположенные слева верхней части передней панели.

2. С помощью провода со штекером соединить клемму 5 на панели установки с гнездом «Л 50 Гц» на боковой панели осциллографа. Включить генератор прямоугольных импульсов тумблером «Л 50 Гц», находящимся на задней панели осциллографа.

3. Установить на магазине сопротивлений значение $R = 1 \text{ Ом}$.

4. Включить питание осциллографа переключателем 1 «ПИТАНИЕ» и дать ему прогреться.

На экране осциллографа появится изображение затухающих колебаний в виде синусоиды с убывающей амплитудой (см. рис. 2).

Ручками 12 « $\leftrightarrow$ » и 9 « $\updownarrow$ » вывести осциллограмму в центр экрана.

Переключателем 11 «ВРЕМЯ/ДЕЛ» выбрать частоту развертки 0,2 ms, ручкой плавной регулировки установить размеры изображения таким образом, чтобы на экране осциллографа наблюдалось не менее десяти периодов собственных колебаний.

Переключатель 8 «V/ДЕЛ» установить в положение 10, ручкой плавной регулировки установить удобные размеры изображения.

5. По шкале осциллографа измерить *одиннадцать* значений последовательно убывающих амплитуд напряжения на конденсаторе U_{ca} и записать полученные значения в табл. 1.

6. Выключить генератор прямоугольных импульсов тумблером «Л 50 Гц», находящимся на задней панели осциллографа.

Таблица 1. Результаты упражнения 1

№	U_{ca} , дел	$\lambda_i = \ln \frac{U_{ca(i)}}{U_{ca(i+1)}}$	$\Delta\lambda_i$	$(\Delta\lambda_i)^2$
1				
2				
...				
10				
11		—	—	—

Упражнение 2. Изучение вынужденных колебаний

Задание: построить резонансные кривые при двух значениях сопротивления контура (см. рис. 5).

1. Включить питание 3Г.

2. Установить на магазине сопротивлений R_1 порядка 1...3 Ом.

3. Настроить изображение вынужденных колебаний в виде синусоиды. Для этого переключатель 18 «УРОВЕНЬ» установить в положение ручного регулирования «ЖДУЦ», далее поворотом переключателя по/против часовой

стрелки добиться устойчивого изображения на экране.

4. Ручками 12 « $\leftrightarrow$ » и 9 « $\updownarrow$ » вывести осциллограмму в центр экрана.

5. Изменяя частоту ЗГ ν (грубо – переключателем диапазонов и точно – вращая штурвал ЗГ) и наблюдая за изменением амплитуды напряжения на экране осциллографа, найти резонансную частоту ν_p вынуждающей ЭДС, при которой амплитуда напряжения на конденсаторе достигает максимума.

Значение резонансной частоты ν_p и величину R_1 записать в табл. 2.

Таблица 2. Результаты упражнения 2

Увеличение частоты ЗГ ν				Уменьшение частоты ЗГ ν			
№	ν , Гц	U_{ca} , дел		№	ν , Гц	U_{ca} , дел	
		$R_1 = \dots$ Ом	$R_2 = \dots$ Ом			$R_1 = \dots$ Ом	$R_2 = \dots$ Ом
1				1			
...				...			
10				10			

6. Установить на ЗГ частоту $\nu_1 = \nu_p$. Переключателем 8 «V/ДЕЛ» с ручкой плавной регулировки установить вертикальный размер осциллограммы 80 дел.

Значения частоты ν_1 и амплитуды U_{ca1} записать в табл. 2.

7. Изменяя не менее 10 раз частоту ЗГ с шагом $\Delta\nu = 100$ Гц в сторону *увеличения* от значения ν_1 , записать в табл. 2 значения амплитуды U_{cai} , соответствующие каждой частоте ν_i .

8. Установить на ЗГ частоту $\nu_1 = \nu_p$.

9. Изменяя не менее 10 раз частоту ЗГ с шагом $\Delta\nu = 100$ Гц в сторону *уменьшения* от значения ν_1 , записать в табл. 2 значения амплитуды U_{cai} , соответствующие каждой частоте ν_i .

10. На магазине сопротивлений установить значение R_2 порядка 5...12 Ом.

11. Последовательно устанавливая на ЗГ частоты ν_i согласно соответствующему столбцу табл. 2, записать значения амплитуды U_{cai} (не меняя переключателем 8 вертикального размера осциллограммы).

12. Значения характеристик контура C , L и R и значение резонансной частоты ν_p записать в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики контура

C , мкФ	L , мГн	R , Ом	$\langle\lambda\rangle$	ν_p , Гц	T , с	$r_{вн}$, Ом

13. Выключить ЗГ. Выключить осциллограф.

Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 1 рассчитать логарифмический декремент затухания λ_i .

2. Рассчитать среднее значение логарифмического декремента $\langle\lambda\rangle$, доверительный интервал $\Delta\lambda$ и относительную погрешность измерения E согласно прилож. 1. Величину $\langle\lambda\rangle$ занести в табл. 3.

3. Полагая, что резонансная частота не отличается от собственной, рас-

считать период собственных колебаний $T = 1/\nu_p$. Величину T занести в табл. 3.

4. Рассчитать и занести в табл. 3 собственное сопротивление контура

$$r_{\text{BH}} = \frac{2 \cdot L}{T} \lambda - R.$$

5. По данным табл. 2 построить в одной системе координат две резонансные кривые $A = f(\nu)$ для сопротивлений контура R_1 и R_2 .

Результаты работы

1. Записать значение логарифмического декремента затухания в виде:

$$\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \Delta_\lambda; \quad E = \dots \%$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какова роль каждого элемента колебательного контура (R , L , C) в процессе колебаний?

2. Запишите уравнения собственных колебаний (незатухающих и затухающих) в дифференциальной форме и их решения.

3. Изобразите графики:

а) зависимости напряжения на конденсаторе от времени;

б) зависимости амплитуды напряжения от времени при затухающих колебаниях.

4. Что называется логарифмическим декрементом затухания? От каких величин зависит быстрота затухания колебаний в контуре?

5. Что такое добротность контура? Каков физический смысл этой величины? От каких величин она зависит?

6. Как возникают вынужденные колебания в контуре? Запишите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение.

7. От каких величин зависит частота собственных колебаний, вынужденных колебаний?

8. От чего зависят амплитуда, частота и фаза напряжения на конденсаторе при вынужденных колебаниях?

9. Что называется резонансной кривой? Как влияет сопротивление, индуктивность и емкость контура на форму резонансной кривой?

10. Постройте векторную диаграмму напряжений при вынужденных колебаниях. Какой вид приобретает эта диаграмма при резонансе?

Дополнительная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. СПб.: Лань, 2022. §89–91.

2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2016. §143, 146–148.

Лабораторная работа № 3-7

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОДНИКОВ

Цели работы: экспериментальная проверка выполнения закона Ома; определение удельного сопротивления проводника методом вольтметра-амперметра.

Прибор – установка для измерения сопротивления проводников.

Теоретическая часть

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов. Упорядоченное движение свободных носителей электрического заряда, возникающее в проводнике под действием электрического поля, называется *током проводимости*. Типичными и наиболее распространенными проводниками являются металлы. В металлах носителями электрического заряда являются свободные электроны. За *направление электрического тока* условно принимается направление движения положительных зарядов. Очевидно, что в металлах движение отрицательных носителей заряда противоположно условному направлению электрического тока.

Электрический ток называется *постоянным*, если сила тока и его направление не изменяются с течением времени. *Сила постоянного тока* численно равна заряду q , проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{q}{t} .$$

Единица силы тока – *ампер* (1 А) – основная единица в системе СИ. Через нее выражаются другие электрические величины.

В металлических проводниках носители заряда – электроны – участвуют в двух движениях: хаотическом со скоростью $\vec{v}$ и направленном со скоростью $\vec{u}$, причем $v \gg u$. Скорость u направленного движения носителей заряда называют еще *дрейфовой скоростью*.

Заряд, протекающий через поперечное сечение проводника S за промежуток времени Δt , можно рассчитать так:

$$\Delta q = enSu\Delta t ,$$

где e – заряд единичного носителя; n – концентрация носителей. Тогда сила тока

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = enSu . \quad (1)$$

Движение электронов в металле не свободное: в процессе движения электроны рассеиваются (взаимодействуют с кристаллической решеткой с изменением импульса) на примесных атомах, дефектах кристаллической решетки и ее тепловых колебаниях. Для поддержания постоянного тока в проводнике необходимо создать в нем электрическое поле напряженностью $\vec{E}$, которое действует на носители заряда с силой $\vec{F} = e\vec{E}$. Электрическое поле в проводнике создают, прикладывая к его концам напряжение U .

Для однородного проводника $E = \frac{U}{l}$, где l – длина проводника.

Движение электрона в проводнике под действием электрического поля можно описать дифференциальным уравнением

$$m \frac{d(\vec{v} + \vec{u})}{dt} = e\vec{E} + \vec{F}_c, \quad (2)$$

где m – масса электрона; $\vec{F}_c$ – сила сопротивления направленному движению электрона со стороны кристаллической решетки проводника. Так как скорости направленного движения очень малы, можно считать силу сопротивления пропорциональной дрейфовой скорости электрона $\vec{F}_c = -\frac{m}{\tau} \vec{u}$, где τ – величина, имеющая размерность времени. Усредняя уравнение (2) по всем носителям заряда, учитывая, что среднее значение скорости носителя $\langle \vec{v} + \vec{u} \rangle = \langle \vec{u} \rangle$, и переходя от векторной записи к скалярной, получаем

$$m \frac{d \langle u \rangle}{dt} = eE - \frac{m}{\tau} \langle u \rangle.$$

Для постоянного тока $\langle u \rangle = \text{const}$, т.е. $\frac{d \langle u \rangle}{dt} = 0$, тогда из предыдущего выражения $\langle u \rangle = eE \frac{\tau}{m}$, из уравнения (1) следует

$$I = \frac{ne^2 \tau S E}{m},$$

или, учитывая, что $E = \frac{U}{l}$, окончательно

$$I = \frac{ne^2 \tau S}{m l} U = \frac{1}{R} U. \quad (3)$$

Таким образом, мы получили так называемый закон Ома в интегральной форме, который утверждает, что *сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению*. Коэффициент пропорциональности между силой тока и напряжением обозначают $\frac{1}{R}$ и называют *проводимостью проводника*, а величину R – *сопротивлением проводника*. Из уравнения (3) следует, что электрическое сопротивление проводника

$$R = \frac{m}{ne^2 \tau} \frac{l}{S}. \quad (4)$$

Единица сопротивления – Ом (1 Ом = 1 В/А).

Зависимость силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения называется *вольтамперной характеристикой проводника (ВАХ)*.

Сопротивление – основная электрическая характеристика проводника. Согласно формуле (4), электрическое сопротивление проводника зависит от его геометрических размеров (длины l и площади поперечного сечения S) и свойств материала (концентрации носителей заряда n и характерного времени τ). Время τ называют *временем релаксации*. Оно равно времени, в течение которого

дрейфовая скорость носителей заряда уменьшается в e раз в отсутствие электрического поля в проводнике (например, при выключении цепи). По величине время релаксации сравнимо со временем свободного пробега носителей заряда при движении их в кристаллической решетке проводника.

Обозначим в уравнении (4) комплекс величин, характеризующих материал проводника:

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau}.$$

Величина ρ получила название *удельное сопротивление проводника*. Согласно выражению (4)

$$\rho = R \frac{S}{l}. \quad (5)$$

Единица удельного сопротивления – 1 Ом · м.

Описание экспериментальной установки

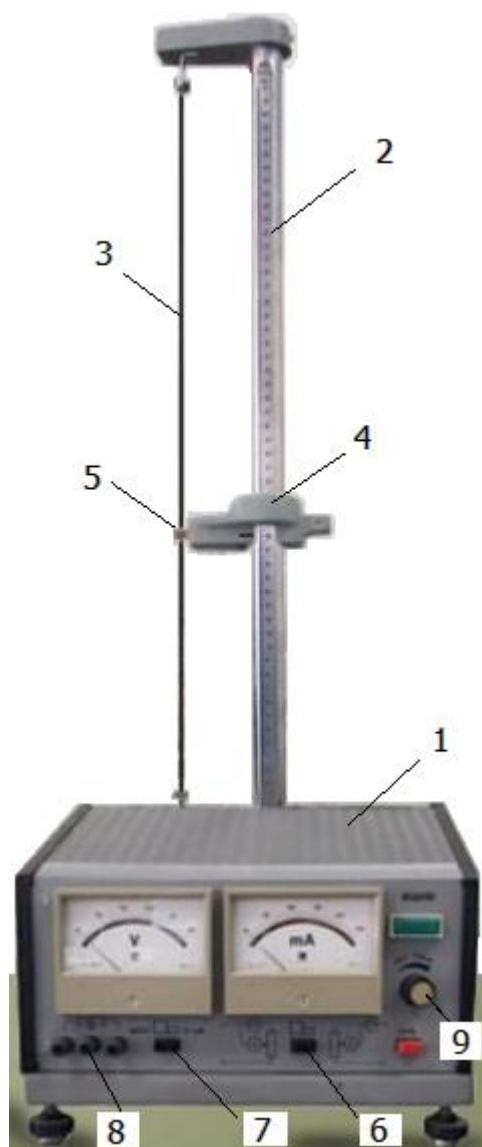


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1. Установка позволяет измерять сопротивление проводника двумя методами: методом вольтметра-амперметра и мостовым методом.

На основании установки закреплены блок управления и измерений 1 и стойка 2 с миллиметровой шкалой. На стойке закреплены два неподвижных кронштейна, между которыми натянута проволока 3 диаметром $d = 0,35$ мм. Длина исследуемого отрезка проволоки регулируется подвижным кронштейном 4, на котором нанесен указатель в виде черты. Исследуемый отрезок проволоки через контактный зажим 5, вмонтированный в подвижный кронштейн, подключается низкоомными проводами к электрической цепи, расположенной внутри блока 1.

Напряжение на исследуемой длине отрезка проволоки измеряется вольтметром V с внутренним сопротивлением $r_V = 2\,500$ Ом, сила тока в проволоке – амперметром A (миллиамперметром) с внутренним сопротивлением $r_A = 0,15$ Ом. Шкалы приборов выведены на лицевую панель блока 1: вольтметра – $0 \dots 1,5$ В; амперметра – $0 \dots 250$ мА.

На лицевой панели блока 1 размещены:
 клавиша «сеть» – вкл/выкл питания источника;
 клавиша 6 – выбор схемы 1 или 2 подключения проволочного сопротивления (рис. 2);
 клавиша 7 – выбор метода измерения сопротивления (мост или $V-mA$);
 клеммы 8 – подключение измерительного моста (в данной работе не используются);
 ручка 9 – регулировка силы тока источника.

Описание методики эксперимента

В данной лабораторной работе удельное сопротивление проводника вычисляется по экспериментально определенной величине сопротивления $R_{пр}$ отрезка проволоки известной длины l . Если сечение проволоки имеет форму круга диаметром d , то формула (5) примет вид

$$\rho = \frac{\pi d^2}{4l} R_{пр}. \quad (6)$$

Согласно закону Ома для участка цепи, сопротивление отрезка проволоки

$$R_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}}, \quad (7)$$

где $U_{пр}$ – напряжение на концах отрезка проволоки; $I_{пр}$ – сила тока в проволоке. В эксперименте величины напряжения и силы тока определяются соответственно по показаниям вольтметра и амперметра. Как показано далее, из-за внутреннего сопротивления электроизмерительных приборов при измерении величин напряжения или силы тока неизбежно возникает погрешность, которую нужно учитывать в зависимости от схемы подключения вольтметра и амперметра.

Рассмотрим две возможные схемы подключения электроизмерительных приборов.

Схема 1 (рис. 2а). В схеме 1 показания амперметра I соответствуют силе тока в проволоке ($I = I_{пр}$). Вольтметр показывает напряжение U на участке цепи ABC, содержащем последовательно соединенные амперметр и отрезок проволоки. Показания вольтметра U в данной схеме завышены по сравнению с напряжением на концах отрезка проволоки $U_{пр}$ на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении амперметра: $U = U_{пр} + U_A$.

Согласно уравнению (7), с учетом вышеизложенного для данной схемы

$$R_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}} = \frac{U - U_A}{I} = \frac{U}{I} - \frac{U_A}{I} = R - r_A = R \left(1 - \frac{r_A}{R} \right),$$

где R – сопротивление участка цепи ABC.

Если $r_A \ll R$, т.е. $\frac{r_A}{R} \rightarrow 0$, то из предыдущего выражения следует, что искомое сопротивление проволоки

$$R_{пр} \rightarrow R = \frac{U}{I}. \quad (8)$$

Относительная погрешность измерения сопротивления проволоки в этом случае

$$E = \frac{R - R_{\text{пр}}}{R_{\text{пр}}} = \frac{r_A}{R_{\text{пр}}}, \quad (9)$$

где учтено, что при последовательном соединении R_A и $R_{\text{пр}}$ сопротивление участка цепи ABC $R = r_A + R_{\text{пр}}$.

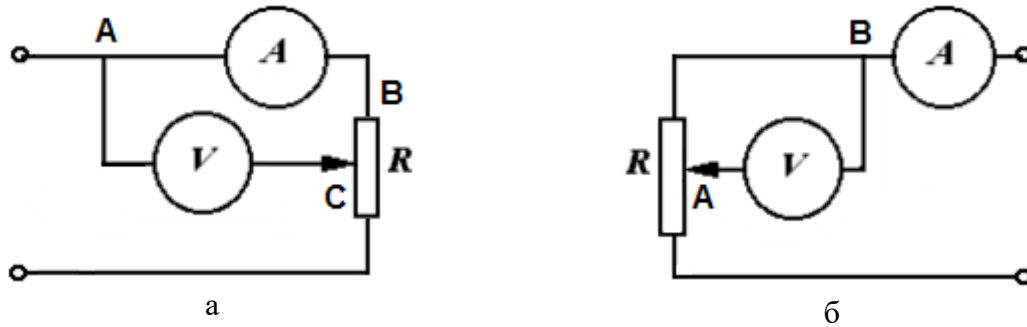


Рис. 2. Схемы измерений: а – схема 1; б – схема 2

Схема 2 (см. рис. 2б). В схеме 2 показания вольтметра соответствуют напряжению на концах отрезка проволоки ($U = U_{\text{пр}}$). Показания амперметра в данной схеме завышены по сравнению с силой тока в исследуемом отрезке проволоки $I_{\text{пр}}$ на величину силы тока, протекающего через вольтметр: $I = I_{\text{пр}} + I_V$.

Согласно уравнению (7), с учетом вышеизложенного для данной схемы

$$R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}} = \frac{U}{I - I_V} = \frac{1}{\frac{I}{U} - \frac{I_V}{U}} = \frac{1}{\frac{1}{R} - \frac{1}{r_V}} = \frac{R}{1 - \frac{R}{r_V}},$$

где R – сопротивление участка цепи АВ.

Если $r_V \gg R$, т.е. $\frac{R}{r_V} \rightarrow 0$, то из предыдущего выражения следует, что искомое сопротивление проволоки

$$R_{\text{пр}} \rightarrow R = \frac{U}{I}. \quad (10)$$

Относительная погрешность измерения сопротивления проволоки в этом случае

$$E = \frac{R_{\text{пр}} - R}{R_{\text{пр}}} = \frac{R_{\text{пр}}}{R_{\text{пр}} + r_V}, \quad (11)$$

где учтено, что при параллельном соединении $R_{\text{пр}}$ и r_V сопротивление участка цепи АВ $R = \frac{R_{\text{пр}} r_V}{R_{\text{пр}} + r_V}$. При $r_V \gg R_{\text{пр}}$ формулу (11) можно записать в виде

$$E = \frac{R_{\text{пр}}}{r_V}. \quad (12)$$

Из выражений (9) и (12) следует, что погрешность измерения сопротивления проволоки по методу вольтметра-амперметра зависит от соотношения

величин измеряемого сопротивления и сопротивлений приборов. Если относительные погрешности измерения будут пренебрежимо малы, то сопротивление проволоки можно рассчитать по показаниям вольтметра и амперметра (см. формулы (8) и (10)):

$$R_{\text{пр}} = \frac{U}{I}. \quad (13)$$

Из уравнения (13) при $R_{\text{пр}} = \text{const}$ следует линейная зависимость напряжения на концах исследуемого отрезка проволоки от силы тока в нем:

$$U(I) = R_{\text{пр}}I,$$

график которой имеет вид прямой линии (рис. 3).

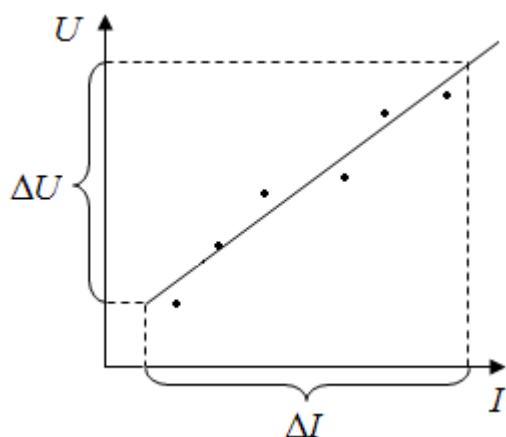


Рис. 3. Определение сопротивления $R_{\text{пр}}$ по ВАХ

Если построенный по результатам эксперимента график зависимости $U(I)$ будет иметь вид прямой линии, то это будет подтверждением выполнения закона Ома для участка цепи.

Сопротивление отрезка проволоки в таком случае можно определить по наклону прямой линии к оси ординат как отношение приращения напряжения ΔU к соответствующему приращению силы тока ΔI (см. рис. 3):

$$R_{\text{пр}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (14)$$

Порядок выполнения работы

Внимание! Запрещается прикасаться к находящейся под напряжением проволоке 3 экспериментальной установки (см. рис. 1).

1. Записать в табл. 1 три длины отрезков проволоки (l_1 , l_2 и l_3), сопротивления которых будут измеряться (задаются преподавателем из интервала 20...50 см).

2. Включить прибор нажатием клавиши «сеть», при этом должна загореться сигнальная лампочка на лицевой панели.

3. Выбрать метод $V-mA$, установив клавишу 7 в нажатое состояние.

4. Выбрать схему 2 подключения проволоки, установив клавишу 6 в нажатое состояние.

5. Установить указатель (черту) подвижного кронштейна 4 на деление шкалы, соответствующее длине отрезка проволоки l_1 .

6. Снять ВАХ проводника, т.е. зависимость $U(I)$. Для этого при помощи ручки 9 последовательно устанавливать значения силы тока, указанные в табл. 1, и записывать соответствующие значения напряжения.

7. Повторить измерения по пункту 6 для других значений длин отрезка проволоки l_2 и l_3 .

8. Выбрать схему 1 подключения проволоки, установив клавишу 6 в отжатое состояние. Снять ВАХ (см. пункт 6) при длине отрезка проволоки l_3 .
9. По окончании измерений выключить прибор клавишей «сеть».

Таблица 1. Результаты измерений и расчеты

I, мА	Опыт 1					Опыт 2					Опыт 3					Опыт 4				
	Схема 2					Схема 2					Схема 2					Схема 1				
	l ₁ =					l ₂ =					l ₃ =									
	U, В	ΔU, В	ΔI, мА	R _{пр} , Ом	E, %	U, В	ΔU, В	ΔI, мА	R _{пр} , Ом	E, %	U, В	ΔU, В	ΔI, мА	R _{пр} , Ом	E, %	U, В	ΔU, В	ΔI, мА	R _{пр} , Ом	E, %
100																				
125																				
150																				
175																				
200																				
225																				

Обработка результатов эксперимента

1. Построить ВАХ для схемы 2 для трех длин отрезка проволоки в одной системе координат.
2. По каждому графику определить сопротивление отрезка проволоки $R_{пр}$ согласно формуле (14). Результаты записать в табл. 1.
3. Рассчитать относительную погрешность измерения по формуле (12) и записать ее значение в процентах в табл. 1.
4. Построить ВАХ для схемы 1 на том же координатном поле, что и для схемы 2.
5. По графику определить сопротивление отрезка проволоки $R_{пр}$ согласно формуле (14). Результаты записать в табл. 1.
6. Рассчитать относительную погрешность измерения по формуле (9) и записать ее значение в процентах в табл. 1.
7. Рассчитать удельное сопротивление проводника для схемы 2 по формуле (6). Результаты записать в табл. 2.

Таблица 2. Расчет удельного сопротивления проводника

Схема 2	№	d , мм	l , см	$R_{пр}$, Ом	ρ , Ом · м	$\Delta\rho$	$(\Delta\rho)^2$
	1						
	2						
	3						

8. Вычислить среднее значение удельного сопротивления $\langle\rho\rangle$, доверительный интервал $\Delta\rho$ и относительную погрешность измерения E согласно прилож. 1.

Результаты работы

1. Сделать вывод о результатах проверки выполнения закона Ома.
2. Сделать вывод о том, какая схема (схема 1 или 2) в данном эксперименте дает меньшую погрешность измерения сопротивлений $R_{пр}$ (см. табл. 1).
3. Записать значение удельного сопротивления в виде:

$$\rho = \langle \rho \rangle \pm \Delta \rho \quad E = \dots \%$$

4. Сравнить полученное значение удельного сопротивления с приведенными в таблице (см. прилож. 4) и сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим током? Какой ток называется постоянным?
2. Какие условия необходимы для протекания тока в проводнике?
3. Запишите закон Ома для участка цепи.
4. Что такое электрическое сопротивление проводника и от чего оно зависит?
5. Что такое удельное сопротивление проводника и от чего оно зависит?
6. Назовите единицы измерения сопротивления и удельного сопротивления в системе СИ.
7. С помощью электрических схем поясните метод вольтметра-амперметра для измерения сопротивления проводника.
8. Какой схемой следует пользоваться при измерении малых сопротивлений, больших сопротивлений? Почему?

Дополнительная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. СПб.: Лань, 2022. §. 31–36.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2016. §. 96–101.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Обработка результатов измерения

Пусть в результате эксперимента получено n значений измеряемой величины u : $u_1, u_2, \dots, u_n$.

Обработка результатов измерения включает в себя этапы:

1. Рассчитывается среднее значение измеряемой величины:

$$\langle u \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_n}{n}.$$

2. Рассчитывается абсолютная погрешность каждого измерения:

$$\Delta u_i = |u_i - \langle u \rangle|.$$

3. Рассчитываются квадраты абсолютных погрешностей каждого измерения $(\Delta u_i)^2$, находится их сумма:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta u_i)^2 = (\Delta u_1)^2 + (\Delta u_2)^2 + \dots + (\Delta u_n)^2.$$

4. Рассчитывается доверительный интервал:

$$\Delta_u = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta u_i)^2}{n(n-1)}},$$

где $t_{\alpha, n}$ – коэффициент Стьюдента, значение которого определяется по таблице в зависимости от числа опытов n и доверительной вероятности α . Чем выше вероятность α , тем больше будет доверительный интервал. Рекомендуется брать $\alpha = 0,95$.

Таблица значений коэффициента Стьюдента

$\frac{n}{\alpha}$	3	4	5	10	15
0,70	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1
0,95	4,3	3,2	2,8	2,3	2,1
0,99	9,9	5,8	4,6	3,3	3,0

5. Рассчитывается относительная погрешность измерения:

$$E = \frac{\Delta_u}{\langle u \rangle} \times 100 \, \%.$$

Результат измерения нужно представить в виде:

$$u = \langle u \rangle \pm \Delta_u; \quad E = \dots \, \%.$$

Приложение 2

Некоторые физические постоянные

Название	Значение
Ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрон-вольт	$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Приложение 3

Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования

Множитель	Приставки	
	Наименование	Обозначение
10^9	гига	Г
10^6	мега	М
10^3	кило	к
10^2	гекто	г
10^1	дека	да
10^{-1}	деци	д
10^{-2}	санти	с
10^{-3}	милли	м
10^{-6}	микро	мк
10^{-9}	нано	н
10^{-12}	пико	п
10^{-15}	фемто	ф

Приложение 4

Удельное сопротивление металлических проводников при температуре 20 °С

Металл	ρ , Ом·м	Металл	ρ , Ом·м	Металл	ρ , Ом·м
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Сталь	$2,0 \cdot 10^{-7}$	Хромель	$0,66 \cdot 10^{-6}$
Алюминий	$2,8 \cdot 10^{-8}$	Манганин	$4,4 \cdot 10^{-7}$	Нихром	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Железо	$9,7 \cdot 10^{-8}$	Константан	$4,9 \cdot 10^{-7}$	Фехраль	$1,3 \cdot 10^{-6}$

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Лабораторная работа № 3–2. Исследование электростатических полей методом моделирования	5
Лабораторная работа № 3–3. Определение удельного заряда электрона	12
Лабораторная работа № 3–3 (М). Определение удельного заряда электрона	17
Лабораторная работа № 3–4. Изучение явления самоиндукции	23
Лабораторная работа № 3–5. Исследование магнитных свойств ферромагнетиков	30
Лабораторная работа № 3–6. Исследование свободных и вынужденных электрических колебаний	36
Лабораторная работа № 3–6. (М) Исследование свободных и вынужденных электрических колебаний	44
Лабораторная работа № 3–7. Изучение электрических характеристик проводников	54
ПРИЛОЖЕНИЯ	
Приложение 1. Обработка результатов измерения	62
Приложение 2. Некоторые физические постоянные	63
Приложение 3 Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования	63
Приложение 4. Удельное сопротивление металлических проводников при температуре 20 °С	63

Физический практикум

Часть 2

Методические указания к лабораторным работам по электромагнетизму

Составители: А.Н. Болотов, А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, А.В. Мишина,
В.В. Новиков, О.О. Новикова, М.В. Новоселова, Е. А. Раткевич

Подписано в печать 18.12.2024

Формат 60x84/16

Физ. печ. л. 4

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 3,72

Заказ № 6

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 3,48

С – 6

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22