

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по физике № 10, 12, 13, 15, 16, 19
для студентов I и II курсов всех факультетов

НОВОСИБИРСК
2023

УДК 537(076.5)
Э454

Составители:

А. В. Баранов (приложение 1),
В. В. Давыдов (приложение 1),
П. А. Крапивко (приложение 2),
А. В. Морозов (лаб. работы № 12, 13, 15, приложение 2),
В. В. Христофоров (лаб. работы № 10, 13, 15, 16, 19, приложение 1),
А. А. Шевченко (лаб. работы № 12, 13, 15, приложение 2)

Разработка и изготовление лабораторных установок:

А. М. Погорельский, А. В. Морозов, А. А. Шевченко, П. А. Крапивко

Подготовка к изданию: *В. В. Христофоров*

Рецензенты:

доц. кафедры ПиТФ НГТУ *С. В. Спутай*,
доц. кафедры физики, техники и технологического
образования НГПУ *С. А. Погожих*

Работа подготовлена на кафедре общей физики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: исследовать электростатическое поле с помощью экспериментального моделирования в проводящей среде, по которой протекает переменный электрический ток. Построить эквипотенциальные и силовые линии этого поля.

Характеристики электростатического поля

Если в пространстве имеется система неподвижных электрически заряженных тел, то в каждой точке этого пространства существует силовое электростатическое поле, которое определяется через силу, действующую на «пробный» заряд, мысленно помещенный в эту точку пространства. «Пробный» заряд q_0 должен быть точечным и достаточно малым по величине, чтобы не вносить существенных искажений в силовое поле, созданное системой зарядов. Напряженность электростатического поля \vec{E} не будет зависеть от величины «пробного» заряда, если ее определить как отношение силы, действующей на «пробный» заряд, к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} . \quad (10.1)$$

Напряженность – силовая характеристика электрического поля.

Электростатическое поле можно представить графически в виде силовых линий, называемых линиями напряженности. Вектор напряженности \vec{E} в каждой точке такой линии направлен по касательной к ней и совпадает с ней по направлению в этой точке. Густота линий характеризует величину (модуль) вектора напряженности электростатического

поля. Например, по мере приближения к точечному заряду эти линии сгущаются, так как напряженность \vec{E} возрастает.

Направление напряженности электростатического поля, как видно из (10.1), совпадает с направлением силы, действующей на «пробный» заряд, если считать этот воображаемый заряд **положительным**.

Силовые линии электростатического поля начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах или уходят на бесконечность. Силовые линии электростатического поля незамкнуты.

Для вектора \vec{E} выполняется **принцип суперпозиции**: напряженность общего поля \vec{E} , созданного несколькими зарядами в некоторой точке пространства, равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым из зарядов в отдельности в этой точке:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (10.2)$$

Сила, действующая на точечный заряд величиной q , полностью определяется величиной самого заряда и напряженностью электростатического поля в данной точке пространства:

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Так как силы взаимодействия двух точечных зарядов направлены вдоль линии, их соединяющей, то сила, действующая на заряд, помещенный в электростатическое поле, является центральной и, следовательно, консервативной. Поэтому работа силы электростатического поля, совершаемая при перемещении заряда в этом поле, не зависит от формы и длины траектории, а определяется лишь начальным и конечным положением перемещаемого заряда на этой траектории. Поскольку электрическое поле не изменяется с течением времени (т. е. является электростатическим), оно потенциально.

В каждой точке такого поля можно, кроме силовой характеристики \vec{E} , ввести его энергетическую характеристику – потенциал φ , который равен

$$\varphi = \frac{W_{\text{пот}}}{q_0},$$

где $W_{\text{пот}}$ – потенциальная энергия пробного заряда q_0 в данной точке.

При перемещении «пробного» заряда q_0 по произвольному пути из точки 1 с потенциалом φ_1 в точку 2 с потенциалом φ_2 силами консервативного электростатического поля совершается работа

$$A_{12} = W_{1\text{пот}} - W_{2\text{пот}},$$

т. е.

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (10.3)$$

Следовательно, разность потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ можно определить как отношение работы сил поля A_{12} к величине заряда q_0 , перемещаемого из положения 1 в положение 2:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{A_{12}}{q_0}.$$

При бесконечно малом перемещении точечного заряда q_0 , равном $d\vec{l}$ в произвольном направлении, силой поля совершается элементарная работа $\delta A = \vec{F} \cdot d\vec{l}$, где $\vec{F} = q_0 \vec{E}$. С другой стороны, эту работу можно выразить через приращение потенциала: $\delta A = -q_0 d\varphi$. Тогда, сокращая на q_0 и приравнявая работы, получаем

$$\vec{E} \cdot d\vec{l} = |\vec{E}| \cdot |d\vec{l}| \cos \alpha = E_l |d\vec{l}| = -d\varphi.$$

Таким образом, установлена связь между проекцией вектора \vec{E} на направление перемещения $d\vec{l}$ и потенциалом φ электрического поля:

$$E_l = -\frac{d\varphi}{dl}. \quad (10.4)$$

С помощью последнего выражения выразим вектор \vec{E} через потенциал. При этом учтем, что

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k},$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты осей x, y, z соответственно.

В соответствии с (10.4)

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}.$$

Следовательно, для вектора \vec{E} можно записать:

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right) = -\text{grad } \varphi, \quad (10.5)$$

т. е. вектор напряженности электростатического поля равен градиенту его потенциала со знаком «минус». Вводя оператор набла

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k},$$

эту же связь можно представить в виде

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi.$$

Итак, силовая \vec{E} и энергетическая φ характеристика электростатического поля связаны друг с другом.

Поверхность, в каждой точке которой потенциал одинаков ($\varphi = \text{const}$), называется эквипотенциальной. Из соотношения $\vec{E} \cdot d\vec{l} = -d\varphi$ следует, что при перемещении заряда вдоль эквипотенциальной поверхности работа электростатического поля равна нулю, что возможно только тогда, когда вектор напряженности \vec{E} перпендикулярен к этой поверхности. Поскольку вектор \vec{E} направлен вдоль касательной к силовой линии, это означает, что **силовые линии пересекают эквипотенциальные поверхности под прямым углом.**

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

В слабопроводящую среду, которую представляет собой недистиллированная вода, на одинаковую глубину помещают два металлических проводника, подсоединенных к источнику переменного тока. Так как проводимость среды намного меньше проводимости помещенных в нее

металлических электродов, то потенциал в разных точках этих электродов с достаточной степенью точности можно считать одинаковым. При этом топография поля в пространстве между ними будет такой же, какой была бы топография электростатического поля между заряженными проводниками, помещенными в однородную непроводящую среду.

В проводящей среде выполняется закон Ома $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$, здесь \vec{j} – вектор плотности тока; σ – удельная электропроводность (проводимость) среды.

Метод моделирования электростатического поля в проводящей среде основан на аналогии уравнений, описывающих электрическое поле в вакууме и в изотропной проводящей среде. Метод удобен на практике, так как позволяет получить путем экспериментального моделирования сложную картину электростатического поля, аналитический расчет которого нередко невозможен из-за сложности граничных условий. Использование переменного тока позволяет предотвратить выделение на электродах составных частей электролита. Для переменного синусоидального тока в электролите переменное электрическое поле не является потенциальным, в каждой точке напряжение изменяется со временем. Однако понятие эквипотенциальной поверхности как поверхности постоянно изменяющегося со временем, но одинакового по амплитуде потенциала можно считать справедливым. Разные эквипотенциальные поверхности при этом характеризуют неодинаковые амплитуды переменного напряжения. Напряжение любой точки внутри электролитической ванны относительно одного из электродов легко измерить вольтметром. Эти измерения позволяют определить местоположение и форму эквипотенциальных поверхностей (в нашем случае линий) поля, созданного в проводящей среде.

По картине эквипотенциальных линий можно построить соответствующую картину силовых линий. Кроме того, по картине эквипотенциальных линий, пользуясь формулой (10.4), можно оценить численное значение напряженности электрического поля в любом месте ванны. При этом следует учесть, что проекция вектора на его собственное направление равна модулю этого вектора и по величине максимальна. Из формулы (10.4) видно, что если в некоторой малой области ванны найти **минимальное расстояние** Δl между двумя ближайшими эквипотенциальными линиями с известными потенциалами φ_1 и φ_2 ,

то отношение $\frac{|\varphi_1 - \varphi_2|}{\Delta l}$ будет максимальным, а следовательно, равным среднему модулю вектора напряженности электрического поля в этой области ванны,

$$|\vec{E}| = \frac{|\varphi_1 - \varphi_2|}{\Delta l}. \quad (10.6)$$

ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Измерительная установка (см. рисунок) включает в себя электролитическую ванну 1, заполненную водой, два электрода 2 и 3, выполненных в виде пластин, подсоединенных к источнику переменного напряжения 4; зонд 5, предназначенный для исследования электрического поля; вольтметр 6, регистрирующий напряжение между электродом 2 и зондом 5, а также проводящее тело (например, металлическое кольцо), предназначенное для погружения в электролит (воду) с целью создания в нем неоднородного электрического поля (на рисунке не показано).

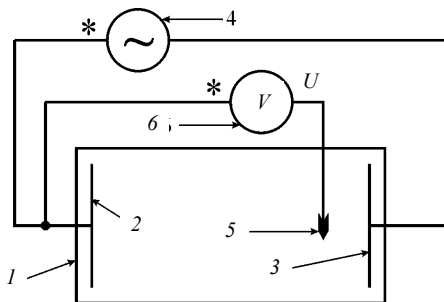


Схема измерительной установки

На дне электролитической ванны имеется координатная сетка, позволяющая воспроизвести картину поля в определенном масштабе на чертеже. Зонд 5 устанавливается в произвольную точку ванны вертикально на одну из линий сетки, его координаты отмечаются на чертеже. Потенциал зонда относительно электрода 2 в этой точке определяют с помощью вольтметра. Зонд 5 перемещается между электродами до тех пор, пока не будут найдены несколько (приблизительно десять) других точек с таким же потенциалом. Координата зонда 5 для каждой из этих

точек отмечается на чертеже. Геометрическое место точек, потенциал которых одинаков, дает одну эквипотенциальную поверхность. Потенциал этой эквипотенциальной поверхности, как отмечалось, измеряется относительно электрода 2. Построив достаточное количество эквипотенциальных поверхностей с некоторой одинаковой разностью потенциалов между ними, получим картину поля между электродами. Разность потенциалов между двумя эквипотенциальными поверхностями и известное расстояние между ними позволяют, как показано выше, оценить величину напряженности электрического поля в любой точке между электродами.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите схему в соответствии с рисунком.
2. Налейте в ванну недистиллированную (водопроводную) воду (слабый электролит). Убедитесь в том, что координатная сетка плотно прилегает ко дну ванны.
3. Начертите в определенном масштабе координатную сетку и отметьте на ней положение и форму электродов и дополнительных тел, если они помещены между электродами.
4. Подключите электроды к генератору звуковых частот либо к генератору переменного напряжения. Установите напряжение U , близкое к максимальному, и частоту $S \sim 1200$ Гц.
5. Поместите зонд в произвольно выбранную точку электролитической ванны, отметьте эту точку на заготовленном изображении координатной сетки. С помощью вольтметра измерьте потенциал поля в этой точке. Перемещая зонд по ванне, найдите семь-десять точек с таким же значением потенциала. Отметьте эти точки на заготовленном изображении координатной сетки.

Примечание. Точки должны располагаться по всей ширине ванны.

6. Соедините отмеченные точки с одинаковым значением потенциала плавной кривой, получив таким образом изображение эквипотенциальной линии.

7. Проведите измерения, аналогичные п. 5, 6, для семи-десяти линий с другими значениями потенциала. Желательно эти потенциалы выбирать такими, чтобы их разность между двумя соседними эквипотенциальными линиями была одинаковой.

Примечание. Картина эквипотенциальных линий должна охватывать всю площадь между электродами.

8. По полученной картине эквипотенциальных линий проведите шесть-семь силовых линий.

Примечание. Линии должны начинаться на одном, а заканчиваться на другом электроде. Один из электродов считайте положительным, а другой – отрицательным.

9. Пользуясь формулой (10.6) и изображенной картиной поля, оцените величину E – напряженности электрического поля в нескольких точках ванны, указанных преподавателем.

10. Положите в ванну хорошо проводящее (металлическое) тело (форма и положение этого тела выбираются по указанию преподавателя).

11. Проведите измерения, аналогичные п. 5, для семи-десяти линий с разными значениями потенциала. Желательно эти потенциалы выбирать такими, чтобы разность потенциалов между двумя соседними эквипотенциальными линиями была одинаковой.

Примечание. Картина эквипотенциальных линий должна охватывать всю площадь между электродами.

12. Начертите картину поля и оцените его напряженность, повторив п. 6–9. Вблизи тела старайтесь проводить измерения особенно тщательно.

13. Сравните результаты, полученные при отсутствии и при наличии хорошо проводящего тела между электродами.

14. Объясните полученные результаты, сделайте и запишите выводы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калашиников С.Г.* Электричество. – М.: Наука, 1974.
2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1982. – Т. 2 (и последующие издания этого курса).
3. *Барановский С.Н., Березиков Д.Д., Погорельский А.М. и др.* Механика. Электричество. Магнетизм. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1995.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

МЕТОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: овладеть методами измерения электрических величин в цепях постоянного и переменного тока с помощью амперметра, вольтметра, осциллографа.

ИЗМЕРЕНИЕ НЕИЗВЕСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВОЛЬТМЕТРА И АМПЕРМЕТРА

Экспериментально установлена зависимость силы тока I , текущего по металлическому проводнику, от напряжения U на концах проводника:

$$I = \frac{U}{R} - \text{закон Ома для участка цепи,}$$

где R – электрическое сопротивление проводника.

Используя рабочую формулу $R = \frac{U}{I}$, можно определить величину сопротивления R для нескольких значений напряжения U на концах резистора.

Измерения U и I проводятся с помощью вольтметра и амперметра по схеме рис. 12.1. На схеме буквами ГН обозначен генератор постоянного напряжения.

Для достоверного определения сопротивления резистора R_x необходимо, чтобы сопротивление вольтметра было много больше измеряемого сопротивления резистора ($R_V \gg R_x$), а сопротивление амперметра много меньше ($R_A \ll R_x$).

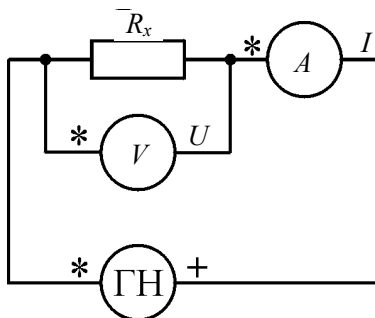


Рис. 12.1

Измерения R_x проводятся при различных значениях напряжения U , которое задается генератором напряжения. Это позволяет определить R_x для нескольких измерений и рассчитать величину погрешности.

ИЗМЕРЕНИЕ НЕИЗВЕСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрим схему моста постоянного тока, показанную на рис. 12.2. Здесь R_x – неизвестное сопротивление; R_1 – переменное сопротивление; R_2 и R_3 – известные сопротивления. Во входную диагональ моста (ab) включается источник постоянного напряжения (ГН), а в выходную (cd) – индикатор равновесия (вольтметр, осциллограф или миллиамперметр с большим внутренним сопротивлением). Если разность потенциалов $\varphi_c - \varphi_d$ между точками c и d равна нулю, мост находится в равновесии. Следовательно, если мост находится в равновесии, измерительный прибор, подключенный к точкам c и d , будет показывать «нуль». Установление состояния равновесия моста обеспечивается изменением переменного сопротивления R_1 . Для того чтобы мост находился в равновесии, необходимо выполнить следующие соотношения:

$$U_{ac} = U_{ad}, \quad (12.1)$$

$$U_{cb} = U_{db}. \quad (12.2)$$

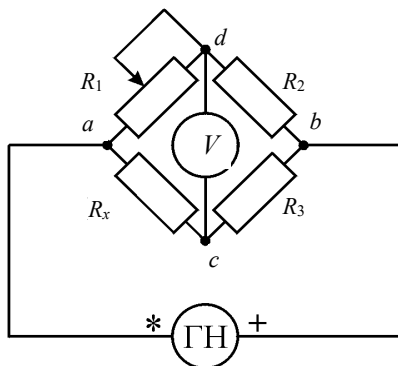


Рис. 12.2

При равновесии моста ток течет только на участке моста acb (обозначим его I_x) и на участке adb (обозначим его I_1), но не течет по диагонали dc .

Запишем закон Ома для каждого сопротивления:

$$U_{ac} = I_x R_x; \quad (12.3)$$

$$U_{ad} = I_1 R_1; \quad (12.4)$$

$$U_{cb} = I_x R_3; \quad (12.5)$$

$$U_{db} = I_1 R_2. \quad (12.6)$$

Процесс измерения состоит в том, что при установленном отношении плеч моста R_3 / R_2 добиваются равновесия моста, изменяя переменное сопротивление R_1 .

Формулу для измеряемого сопротивления R_x получим из (12.3)–(12.6), используя (12.1), (12.2):

$$I_x R_x = I_1 R_1, \quad (12.7)$$

$$I_x R_3 = I_1 R_2. \quad (12.8)$$

Разделив (12.7) на (12.8), получим для измеряемого сопротивления

$$R_x = \frac{R_3}{R_2} R_1. \quad (12.9)$$

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Осциллограф позволяет проводить измерение параметров как постоянных, так и изменяющихся со временем электрических сигналов. Для этого напряжение с генератора U_x подается на один из каналов осциллографа, как показано на рис. 12.3–12.5.

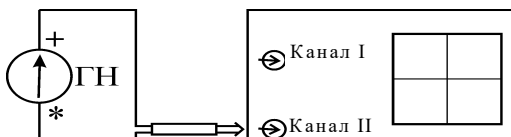


Рис. 12.3

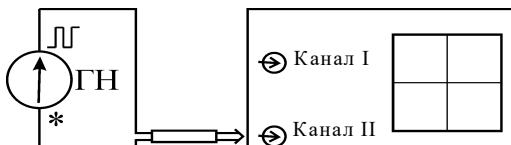


Рис. 12.4

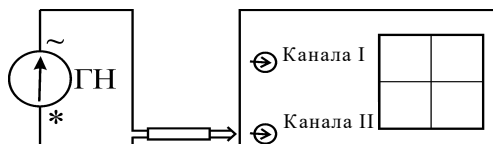


Рис. 12.5

Подобрав соответствующее положение переключателей, на экране осциллографа получим осциллограмму, удобную для наблюдения (см. приложение). Определив цену деления j_x по оси x , вычислим длительность временных интервалов изучаемой осциллограммы по формуле

$$\Delta t = n j_x,$$

где n – число делений по оси x на экране осциллографа, на которых укладывается изучаемая часть сигнала.

Таким же образом, определив цену деления j_y по оси y , найдем величину напряжения подаваемого постоянного или переменного электрического сигнала.

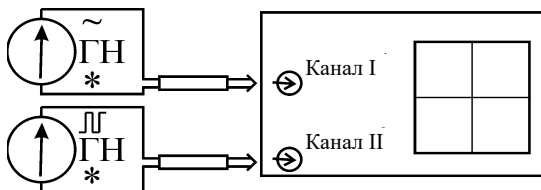


Рис. 12.6

Некоторые модели осциллографов позволяют не только наблюдать одновременно два сигнала на экране, но и осуществлять сложение этих сигналов. При этом возможны два режима сложения. В первом режиме переменные сигналы смещают светящуюся точку на экране вдоль одной оси координат (обычно вдоль оси y). При этом происходит сложение одинаково направленных колебаний светящейся точки на экране осциллографа. Во втором режиме один сигнал смещает светящуюся точку вдоль оси y , а другой сигнал – вдоль оси x . При этом происходит сложение взаимно перпендикулярных колебаний светящейся точки на экране осциллографа. Для осуществления этих режимов сложения сигнал (напряжение) с одного генератора U_{x1} подается на вход первого канала осциллографа, а напряжение с другого генератора U_{x2} – на вход второго канала, как показано на рис. 12.6 (описание органов управления осциллографами см. в приложении).

ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Соберите схему, показанную на рис. 12.1.
2. Проведите измерение неизвестных сопротивлений R_{1x} и R_{2x} с помощью вольтметра и амперметра, изменяя величину напряжения генератора постоянного напряжения в пределах от 1 до 15 В. Выполните шесть измерений при различных напряжениях.
3. Рассчитайте наиболее вероятное значение каждого сопротивления и его случайную погрешность по формуле для многократных прямых измерений при доверительной вероятности, равной 0,95 [4].
4. Соберите схему, показанную на рис. 12.2.

Внимание! В качестве резистора, обозначенного как R_2 , рекомендуется использовать резистор с сопротивлением, равным 680 Ом, а в качестве резистора, обозначенного на рис. 12.2 как R_3 , – резистор 820 Ом. Напряжение генератора установите в диапазоне от 5 до 15 В.

5. С помощью метода равновесия моста постоянного тока определите величины тех же двух неизвестных сопротивлений R_{1x} и R_{2x} . Сравните с результатами, полученными в п. 2, 3. Сделайте выводы.

6. Подключите генератор постоянного напряжения к осциллографу (рис. 12.3).

7. Измерьте напряжение сигнала. Как называется сигнал такой формы?

8. Подключите генератор прямоугольных импульсов к осциллографу (рис. 12.4). Зарисуйте полученный сигнал.

9. Измерьте амплитудное напряжение сигнала. Определите период и частоту сигнала. Назовите форму сигнала.

10. Подключите генератор синусоидального напряжения к осциллографу (рис. 12.5). Зарисуйте полученный сигнал.

11. Измерьте амплитудное напряжение сигнала U . Рассчитайте значение действующего напряжения по формуле $U_d = \frac{U}{\sqrt{2}}$. Определите период и частоту сигнала. Назовите форму сигнала.

12. Подключите генератор синусоидального напряжения на вход одного канала осциллографа, а генератор прямоугольных импульсов на вход другого канала (рис. 12.6). (Используйте выходы одного прибора, чтобы оба сигнала были синфазны. В таком случае на экране осциллографа будет устойчивая картина.) Переключите управляющие кнопки так, чтобы наблюдать одновременно оба сигнала друг под другом (см. приложение).

13. Зарисуйте эти сигналы.

14. Переключая режим работы осциллографа, сложите сигналы как одинаково направленные.

15. Зарисуйте полученный суммарный сигнал.

16. Переключая режим работы осциллографа, сложите сигналы как направленные взаимно перпендикулярно.

17. Зарисуйте полученную на экране траекторию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калашиников С.Г.* Электричество. – М.: Наука, 1977.
2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1982. – Т. 2 (и последующие издания этого курса).
3. *Электрические измерения*: учебник для вузов / под ред. А.В. Фремис, Е.М. Душина. – Л.: Энергия, 1980. – С. 39.
4. *Механика и термодинамика*: метод. указания к вводному занятию и к лабораторным работам № 0 – 6 по физике. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 11–12 (и последующие издания этого пособия).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ИСТОЧНИКА ЭДС

Цель работы: проверить теоретическую зависимость полной, полезной мощности, мощности потерь, падения напряжения во внешней цепи и КПД источника ЭДС от силы тока.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА И УСТАНОВКИ

Электрическая схема измерительной установки (рис. 13.1) состоит из внешнего сопротивления R источника постоянного напряжения с электродвижущей силой ε [1] и внутренним сопротивлением r . В схему включены амперметр и вольтметр, позволяющие измерять ток и падение напряжения во внешней цепи.

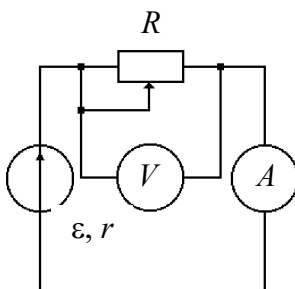


Рис. 13.1

Используя закон Ома для этой замкнутой цепи, можно получить выражение [1]

$$\varepsilon = IR + Ir, \quad (13.1)$$

где I – сила тока в цепи; $U = IR$ – напряжение на сопротивлении R , измеряемое вольтметром (рис. 13.1). Следовательно, ожидаемая зависимость напряжения U от силы тока I имеет вид

$$U = \varepsilon - Ir. \quad (13.2)$$

График этой зависимости представлен прямой линией a на рис. 13.2. Причем пересечение графика с осью напряжений ($I = 0$) происходит в точке $U = \varepsilon$, а точка пересечения графика с осью токов ($U = 0$) дает значение силы тока короткого замыкания источника $I = I_k$ (подробнее об этом токе смотри ниже). Важно отметить, что последнее утверждение – это идеализация. В реальных источниках ЭДС при токах, близких к I_k , линейный характер зависимости напряжения U от силы тока I нарушается, как это показано линией b на рис. 13.2 [3]. У одних источников это вызвано уменьшением ЭДС при таких токах, у других – увеличением внутреннего сопротивления, а у третьих – одновременным влиянием двух названных причин. Кроме того, сопротивление внешнего резистора при больших силах тока может изменяться из-за повышения его температуры.

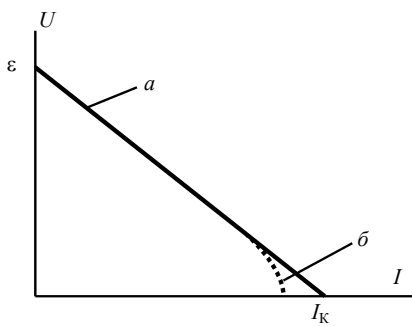


Рис. 13.2

Умножив обе части уравнения (13.1) на силу тока, протекающего по цепи, получим

$$I\varepsilon = I^2 R + I^2 r. \quad (13.3)$$

Уравнение (13.3) представим в виде

$$P = P_1 + P_2, \quad (13.4)$$

где $P = I\varepsilon$ – полная мощность, развиваемая источником; $P_1 = I^2 R = IU$ – полезная мощность, т. е. мощность, развиваемая силами электрического поля, которое поддерживается источником, во внешней цепи (на сопротивлении R); $P_2 = I^2 r$ – потери мощности внутри источника (на сопротивлении r).

Установим зависимость этих мощностей от силы тока.

Графически (рис. 13.3) зависимость полной мощности от силы тока $P = I\varepsilon$ выражается прямой линией, проходящей через начало координат.

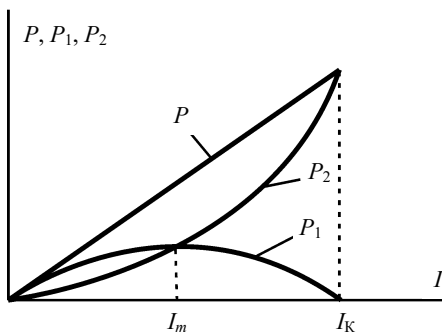


Рис. 13.3

Полезная мощность из (13.3) может быть представлена в виде

$$P_1 = \varepsilon I - I^2 r. \quad (13.5)$$

Эта зависимость выражается параболой. Найдем значение тока I_m , при котором полезная мощность максимальна. Для этого, взяв первую про-

изводную $\frac{dP_1}{dI}$, приравняем ее к нулю:

$$\frac{dP_1}{dI} = \varepsilon - 2Ir, \quad (13.6)$$

откуда при $\frac{dP_1}{dI} = 0$ получим

$$I_m = \frac{\varepsilon}{2r}. \quad (13.7)$$

Так как вторая производная $\frac{d^2 P_1}{d^2 I} = -2r$ отрицательна, то при значении силы тока I_m полезная мощность имеет максимум $P_{1\max}$, величина которого после подстановки (13.7) в (13.5) оказывается равной

$$P_{1\max} = \frac{\varepsilon^2}{4r}.$$

Подставив (13.7) в (13.1), видим, что при $I = I_m$ выполняется равенство $R = r$. Следовательно, полезная мощность P_1 максимальна при условии, что сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника питания $R = r$.

Потери мощности определяются зависимостью

$$P_2 = I^2 r. \quad (13.8)$$

Графически зависимость P_2 от I выражена параболой с вершиной в начале координат и ветвью, направленной вверх (рис. 13.3).

Коэффициентом полезного действия η источника ЭДС называется величина, равная отношению полезной мощности к соответствующей полной мощности:

$$\eta = \frac{P_1}{P} = \frac{IU}{I\varepsilon} = \frac{U}{\varepsilon}. \quad (13.9)$$

Выражение для U подставим из (13.2) в (13.9):

$$\eta = \frac{\varepsilon - Ir}{\varepsilon} = 1 - I \frac{r}{\varepsilon}. \quad (13.10)$$

Из уравнения (13.10) видно, что зависимость η от I выражается прямой линией (рис. 13.4), убывающей от значения $\eta = 1$ при токе $I = 0$ до значения $\eta = 0$ при токе

$$I_k = \frac{\varepsilon}{r}. \quad (13.11)$$

Это значение уже упомянутого выше тока короткого замыкания [1]. Действительно, из (13.1) видно, что при внешнем сопротивлении $R = 0$ (короткое замыкание источника) сила тока достигает наибольшего значения, даваемого формулой (13.11). Полезная мощность P_1 при этом убывает до нуля (рис. 13.3), так как при сопротивлении $R = 0$

$$P_1 = I_k U = I_k^2 R = 0.$$

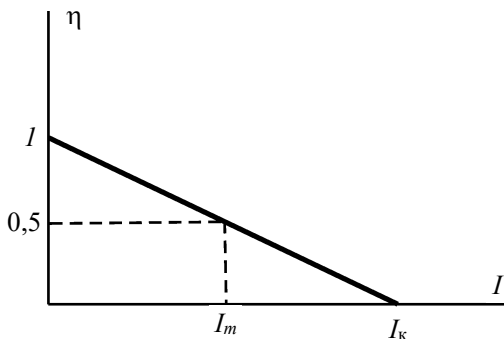


Рис. 13.4

Полная мощность $P = \varepsilon I_k$ и потери мощности $P_2 = I_k^2 r$ при токе короткого замыкания $I = I_k$ достигают наибольшего значения и равны друг другу:

$$P_{\max} = P_{2\max} = \frac{\varepsilon^2}{r}.$$

Найдем значение КПД и соотношения между мощностями P , P_1 , P_2 при максимуме полезной мощности $P_1 = P_{1\max}$. Так как полезная мощность максимальна при условии, что $R = r$, то КПД при этом равен

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{r}{2r} = 0,5 = 50\%. \quad (13.12)$$

Отсюда при токе $I = I_m$ полезная максимальная мощность равна $P_{1\max} = 0,5P$. Используя (13.4), при токе $I = I_m$ получаем равенство полезной мощности и мощности потерь $P_{1\max} = P_2$.

Из графиков зависимостей мощностей и КПД от силы тока (рис. 13.3, 13.4) видим, что условия получения наибольшей полезной мощности $P_{1\max}$ и наибольшего КПД η_{\max} несовместимы. Когда P_1 достигает наибольшего значения, сила тока равна I_m и $\eta = 0,5$ или 50 %. Когда же КПД близок к единице, полезная мощность P_1 мала по сравнению с максимальной мощностью $P_{1\max}$, которую мог бы развить данный источник.

Выразив напряжение $U = \varepsilon - Ir$ (13.2), построим зависимость $U = f(I)$ (см. рис. 13.2). Это – прямая, спадающая от значения U_{xx} (напряжение холостого хода), равного $U_{xx} = \varepsilon$, до нуля при токе, равном току короткого замыкания. Графический метод определения тока короткого замыкания I_k и ЭДС $\varepsilon = U_{xx}$, так называемый метод короткого замыкания и холостого хода позволяет без измерения определить I_k и ε .

На практике он используется следующим образом. Изменяя в некоторых пределах сопротивление R , измеряют несколько значений тока I и соответствующие значения напряжения U . На чертеже строят зависимость $U = f(I)$, графиком которой будет прямая линия. Продолжив ее до пересечения с осью напряжения U , находят значение ЭДС источника ($U_{xx} = \varepsilon$), а продолжив до пересечения с осью тока I , определяют силу тока короткого замыкания I_k . Внутреннее сопротивление источника ЭДС определяют по формуле

$$r = \frac{\varepsilon}{I_k}. \quad (13.13)$$

ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Предварительно подготовьте протокол, в котором начертите таблицу для прямых и косвенных измерений U, I, P, P_1, P_2, η .
2. Постройте на миллиметровой бумаге необходимые оси координат.
3. Соберите электрическую схему установки. В качестве источника с электродвижущей силой ε и внутренним сопротивлением r используйте генератор постоянного напряжения ГПН с включенным тумблером «Внутреннее сопротивление» $R_{вн}$ на его передней панели.

4. Изменяя сопротивление R цепи, снимите зависимость U от I и постройте ее график. Определите по графику путем его экстраполяции до пересечения с осями координат значения ЭДС генератора (источника тока) и тока короткого замыкания I_k .

5. Определите по формуле (13.13) внутреннее сопротивление r источника тока.

6. Вычислите значения P , P_1 , P_2 , η .

7. Используя ранее построенный график $U(I)$ (см. п. 4), постройте зависимости этих величин от силы тока, экстраполируя кривые и прямые до пересечения с осями координат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калашиников С.Г.* Электричество. – М.: Наука, 1964.
2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1978. – Т. 2 (и последующие издания этого курса).
3. *Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В.* и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СОЛЕНОИДА

Цель работы: изучить явления самоиндукции, понятие индуктивности и методы измерения индуктивности соленоида.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

1. Индуктивность контура. Явление самоиндукции

Вокруг любого проводника с током I существует магнитное поле.

Собственное магнитное поле контура с током создает собственный магнитный поток Φ_c через воображаемую поверхность S , ограниченную этим контуром:

$$\Phi_c = \int_S B_n dS, \quad (15.1)$$

где B_n – проекция вектора индукции \vec{B} магнитного поля тока I на нормаль к элементу поверхности dS .

Из закона Био–Савара–Лапласа и принципа суперпозиции следует, что эта проекция при постоянном значении магнитной проницаемости μ равна

$$B_n = \left[\oint_{\Gamma} d\vec{B} \right]_n = \frac{\mu_0}{4\pi} I \left(\oint_{\Gamma} \frac{1}{r^3} [\vec{dl}, \vec{r}] \right)_n,$$

где $d\vec{B}$ – вектор индукции магнитного поля, созданного элементом $d\vec{l}$ замкнутого контура Γ с током I в точке, местоположение которой относительно $d\vec{l}$ определяется радиусом-вектором \vec{r} .

Подставляя выражение для B_n в формулу (15.1) и вынося из-под знака интеграла постоянные, получаем

$$\Phi_c = \left\{ \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \int_S dS \left(\oint_{\Gamma} \frac{1}{r^3} [d\vec{l}, \vec{r}] \right)_n \right\} I \quad (15.2)$$

или

$$\Phi_c = LI.$$

Коэффициент пропорциональности L между собственным потоком вектора магнитной индукции Φ_c через поверхность, ограниченную контуром, и силой тока I в этом контуре называется индуктивностью контура (коэффициентом самоиндукции).

Из формулы (15.2) следует, что индуктивность контура зависит только от геометрических размеров, формы контура и магнитной проницаемости μ той среды, в которой он находится.

Единица индуктивности в СИ называется генри (Гн): $1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ А}}$,

где 1 Вб (вебер) – единица магнитного потока, 1 А (ампер) – единица силы тока.

Для соленоида, длина которого много больше диаметра, витки плотно прилегают друг к другу и сделаны из проводника с очень малым поперечным сечением, индуктивность выражается следующей формулой:

$$L = \mu \mu_0 n^2 V, \quad (15.3)$$

где n – плотность намотки витков соленоида $\left(n = \frac{N_1}{l}, \text{ где } N_1 - \text{число витков намотанных на длине } l \text{ соленоида} \right)$; V – объем соленоида; μ – магнитная проницаемость материала сердечника.

Если сила тока, протекающего по контуру, изменяется со временем, то в соответствии с законом Фарадея в контуре наводится ЭДС самоиндукции E_c ,

$$E_c = -\frac{d\Phi_c}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt}.$$

Если контур с током не деформируется и магнитная проницаемость среды μ не изменяется (нет ферромагнетиков в магнитном поле контура), то индуктивность $L = \text{const}$ и

$$E_c = -L \frac{dI}{dt}. \quad (15.4)$$

По правилу Ленца, ЭДС самоиндукции противодействует изменению тока в контуре, замедляя как его возрастание, так и убывание.

2. Закон изменения тока в цепи при подключении и отключении источника. Применение закона для определения индуктивности (первый способ)

Найдем изменение тока в цепи, состоящей из последовательно соединенных соленоида, индуктивность которого равна L , и резистора, активное сопротивление которого R (рис.15.1).

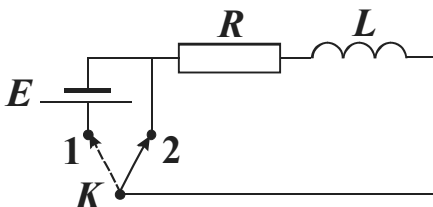


Рис. 15.1

Будем считать, что путем переключения ключа K из положения 1 в положение 2 и обратно можно отключать или подключать источник с ЭДС E , сохраняя при этом замкнутость цепи.

Если внешнее магнитное поле отсутствует или постоянно, а контур неподвижен, то индукционные явления обусловлены только самоиндукцией.

Рассмотрим контур, в котором одновременно действует как ЭДС источника E , так и ЭДС самоиндукции E_c . Из закона Ома для замкнутой цепи с активным сопротивлением R сила тока равна

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

Для нахождения зависимости силы тока от времени разделим переменные:

$$\frac{dI}{E - IR} = \frac{1}{L} dt.$$

Полагая E, R, L постоянными и интегрируя, получаем

$$\ln(E - IR) = -\frac{R}{L}t + \ln C,$$

где C – постоянная интегрирования, значение которой определяется начальными условиями решаемой задачи.

Пусть в момент $t = t_1$ сила тока $I = I_1$. Тогда

$$E - IR = (E - I_1 R) e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Выразив силу тока, получим

$$I = I_1 e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} + \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} \right). \quad (15.5)$$

Из этой общей формулы можно найти зависимость силы тока от времени при замыкании цепи. В этом случае начальный ток равен нулю ($I_1 = 0$) и выражение (15.5) приобретает вид

$$I = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} \right). \quad (15.6)$$

Из этой формулы видно, что сила тока при замыкании цепи постепенно увеличивается, стремясь к $I(t \rightarrow \infty) = E / R$, соответствующей величине постоянного тока (рис. 15.2). Нарастание тока происходит тем медленнее, чем меньше отношение R / L в показателе степени экспоненты или больше обратное отношение $\tau = L / R$, физический смысл которого обсуждается ниже.

Если же в момент t_1 при силе тока I_1 источник ЭДС отключить ($E = 0$), сохранив замкнутость цепи, то из формулы (15.5), получим следующую зависимость силы тока от времени:

$$I = I_1 e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)}. \quad (15.7)$$

В этом случае сила тока в цепи постепенно уменьшается от начального значения I_1 , стремясь к нулю. При этом за время $t - t_1 = \tau = L / R$ (**время релаксации**) сила тока изменяется в e раз ($e \approx 2,71$).

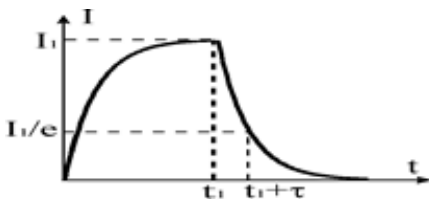


Рис. 15.2

Следует заметить, что в опыте удобнее снимать вместо зависимости силы тока в цепи от времени $I(t)$ зависимость напряжения на некотором известном активном сопротивлении R_1 , последовательно включенном в цепь, от времени $U(t)$. Напряжение в этом случае будет пропорционально силе тока.

Из сказанного ясно, что, измерив силы токов (или величину напряжений) в некоторые моменты t_a , t_b и зная, кроме того, величину общего активного сопротивления контура R , можно с помощью зависимостей (15.6) или (15.7) определить индуктивность контура L .

Особенно просто, зная активное сопротивление цепи R , определить ее индуктивность L , измерив время релаксации τ :

$$L = R\tau. \quad (15.8)$$

3. Вынужденные электромагнитные колебания в контуре, их применение для измерения индуктивности (второй способ)

Рассмотрим контур, состоящий из последовательно соединенных конденсатора емкостью C , активного сопротивления R и соленоида индуктивностью L .

Для получения незатухающих электромагнитных колебаний необходимо включить в контур источник тока с периодически изменяющейся ЭДС (рис. 15.3).

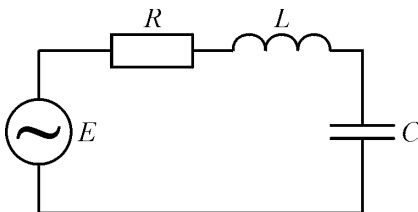


Рис. 15.3

В этом случае колебания в контуре являются вынужденными. Пусть внешняя ЭДС изменяется по гармоническому закону

$$E = E_0 \cos(\omega t).$$

Тогда, используя закон Ома, можно получить следующее дифференциальное уравнение вынужденных электромагнитных колебаний в контуре:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E_0 \cos(\omega t)$$

и, решив это уравнение, найти для установившихся вынужденных колебаний связь амплитудных значений силы тока и внешней ЭДС:

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{E_0}{Z}, \quad (15.9)$$

где величина Z называется полным сопротивлением электрической цепи переменного тока.

В нее входят **активное сопротивление** R контура, **емкостное сопротивление** $Z_C = \frac{1}{\omega C}$ и **индуктивное сопротивление** $Z_L = \omega L$.

Если электрическая емкость контура стремится к бесконечности ($C \rightarrow \infty$), т. е. емкостное сопротивление к нулю, то формула (15.9) упрощается:

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}. \quad (15.10)$$

Используя это выражение, получаем рабочую формулу для экспериментального определения индуктивности соленоида. При этом учтем, что амплитуда падения напряжения на активном сопротивлении R связана с амплитудой силы тока в цепи формулой

$$I_0 = \frac{(U_R)_0}{R}. \quad (15.11)$$

Из выражений (15.10) и (15.11) получим

$$L = \frac{R}{\omega} \sqrt{\frac{E_0^2}{(U_R)_0^2} - 1}. \quad (15.12)$$

ПЕРВЫЙ ВАРИАНТ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Оценка индуктивности соленоида

ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Приступите к определению индуктивности первым способом. Подключите последовательно соединенные резистор R_1 и катушку индуктивности L_1 без ферромагнитного сердечника к генератору прямоугольных импульсов (рис. 15.4).

2. Подключите Y -вход осциллографа к резистору R_1 . На генераторе установите частоту 400 или 1200 Гц. Получите на экране устойчивую

картину изменения напряжения на этом сопротивлении со временем, подобную той, что показана на рис. 15.2.

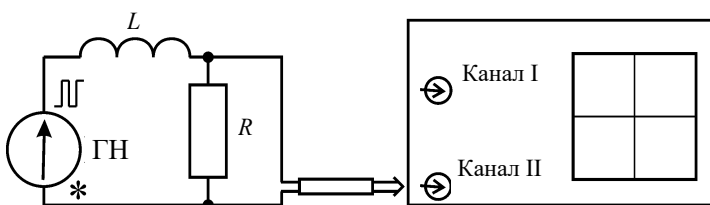


Рис. 15.4

3. Зная время развертки осциллографа, определите время релаксации τ , а затем по формуле (15.8) вычислите величину индуктивности L_1 . При этом общее сопротивление цепи R можно приближенно заменить значением R_1 , пренебрегая внутренним сопротивлением генератора и активным сопротивлением катушки. Поэтому полученное численное значение индуктивности следует рассматривать как оценочное.

4. Повторите измерения L_1 , подключая другие резисторы. Проверьте, зависят ли получаемые значения индуктивности от сопротивления.

5. Приступите к измерению индуктивности вторым способом. Для этого подключите последовательно соединенные резистор R_1 и катушку индуктивности L_1 к звуковому генератору (рис. 15.5), установив на нем некоторые значения частоты в диапазоне 5...15 кГц и амплитуды сигнала. (При таких частотах ток в цепи определяется в основном индуктивным сопротивлением катушки, что повышает точность измерения индуктивности.)

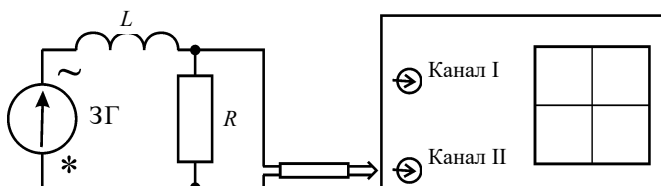


Рис. 15.5

6. С помощью осциллографа измерьте амплитудное значение падения напряжения на резисторе R_1 .

7. Отключите Y -вход осциллографа от резистора, а звуковой генератор от RL -контура и, не изменяя величину сигнала $3Г$, измерьте с помощью осциллографа амплитудное значение ЭДС генератора E_0 (см. схему рис. 12.5).

8. Вычислите индуктивность по формуле (15.12).

9. Определите индуктивность, установив другие значения величин R, E_0, ω . Проверьте, влияют ли эти параметры на результаты измерения.

10. Сравните результаты измерения индуктивности L_1 двумя способами. Объясните различие этих результатов.

ВТОРОЙ ВАРИАНТ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Измерение индуктивности соленоида

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Выполняя лабораторную работу по первому варианту, мы не могли рассчитывать на высокую точность определения индуктивности, так как пренебрегли активными сопротивлениями генератора и катушки.

Теперь же учтем, что общее активное сопротивление контура R равно сумме известного сопротивления R_1 и неизвестного заранее сопротивления R^* , обусловленного внутренним сопротивлением генератора, сопротивлением соединительных проводов, сопротивлением провода катушки соленоида:

$$R = R_1 + R^* .$$

С учетом этого перепишем формулу (15.7) в виде

$$I = I_1 e^{-\frac{(R_1 + R^*)}{L}(t - t_1)} . \quad (15.13)$$

Тогда время релаксации при подключении сопротивления R_1 можно записать как

$$\tau_1 = \frac{L}{R_1 + R^*} . \quad (15.14)$$

Это время можно измерить с помощью осциллографа и схемы, показанной на рис. 15.4.

Если заменить сопротивление R_1 другим сопротивлением R_2 , то время релаксации станет равным

$$\tau_2 = \frac{L}{R_2 + R^*}. \quad (15.15)$$

Рассматривая (15.14) и (15.15) как систему двух уравнений с двумя неизвестными R^* и L , находим:

$$R^* = R_2 - \frac{\tau_1}{\tau_2} R_1 \bigg/ \frac{\tau_1}{\tau_2} - 1, \quad (15.16)$$

$$L = (R_1 + R^*)\tau_1, \text{ или } L = (R_2 + R^*)\tau_2. \quad (15.17)$$

Формулы (15.17) позволяют, измерив τ_1 и τ_2 , определить индуктивность соленоида с учетом R^* , т. е. существенно повысить точность измерения.

Теперь рассмотрим второй способ определения индуктивности L соленоида с помощью вынужденных электромагнитных колебаний в контуре.

Учтем, что в формулу (15.10) входит общее сопротивление контура

$$R = R_1 + R^*,$$

а в формулу (15.11) – напряжение на сопротивлении R_1 .

С учетом этого приравняем правые части формул (15.10) и (15.11):

$$\frac{E_0}{\sqrt{(R_1 + R^*)^2 + (\omega L)^2}} = \frac{(U_R)_0}{R_1}. \quad (15.18)$$

Выражая из (15.18) индуктивность, получаем

$$L = \frac{R_1}{\omega} \sqrt{\left[\frac{E_0}{(U_{R_1})_0} \right]^2 - \left[\frac{R}{R_1} \right]^2}. \quad (15.19)$$

Формула (15.19) переходит в (15.12) при $R \rightarrow R_1$, т. е. при условии $R^* \ll R_1$. Кроме того, из (15.19) видно, что точность определения L повышается с ростом отношения $\frac{E_0}{(U_{R_1})_0}$. Это отношение велико, если па-

дение напряжения происходит в основном на индуктивном сопротивлении: $L\omega \gg R$. Поэтому, как отмечалось выше, если проводить измерения при достаточно больших частотах ω , можно получить хорошую точность, используя упрощенную формулу (15.12).

ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Приступите к измерению индуктивности первым способом. Подключите последовательно соединенные резистор R_1 и катушку индуктивности L_1 без ферромагнитного сердечника к генератору прямоугольных импульсов (рис. 15.4).

2. Подключите Y-вход осциллографа к резистору R_1 . На генераторе установите частоту 400 или 1200 Гц. Получите на экране устойчивую картину изменения напряжения на этом сопротивлении со временем, подобную той, что показана на рис. 15.2. Зная время развертки осциллографа, определите время релаксации τ_1 (см. приложение).

3. Отключите сопротивление R_1 и замените его сопротивлением R_2 .

4. Определите с помощью осциллографа время релаксации τ_2 .

5. Пользуясь формулами (15.16) и (15.17), определите величины R^* и L_1 .

6. Приступите к измерению индуктивности вторым способом. Для этого подключите последовательно соединенные резистор R_1 и катушку индуктивности L_1 к звуковому генератору (рис. 15.5), установив на нем значение частоты ~ 15 кГц и некоторое значение амплитуды сигнала.

7. С помощью осциллографа измерьте амплитудное значение падения напряжения на резисторе R_1 .

8. Повторите измерения амплитуды при частотах ~ 6 и ~ 2 кГц.
9. Отключите осциллограф от концов резистора, а звуковой генератор от RL -контура и, не изменяя величину его сигнала, измерьте с помощью осциллографа амплитудное значение ЭДС генератора E_0 .
10. Вычислите индуктивность по формуле (15.12) для всех трех частот.
11. Сравните результаты измерения, объясните различия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Милковская Л.Б. Курс физики: учебник. – М.: Высшая школа, 1964. – Т. 2: Электричество и магнетизм.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1978. – Т. 2 (и последующие издания этого курса).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ, ТРАНСФОРМАТОР

Цель работы: изучить явление взаимной индукции, измерить индуктивность магнитосвязанных соленоидов, определить коэффициент трансформации трансформатора.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

1. Магнитосвязанные соленоиды

Рассмотрим два соленоида с индуктивностями L_1 и L_2 , по виткам которых течет электрический ток силой I . Поставим вопрос: чему равна индуктивность системы, состоящей из этих последовательно соединенных соленоидов, если они расположены так, что их магнитные поля перекрываются?

Индуктивность системы определяется потокоцеплением, т. е. общим потоком через все витки:

$$\Psi = LI.$$

Суммарный магнитный поток равен алгебраической сумме потоков, пронизывающих все витки соленоида. Все витки первого соленоида пронизываются собственным потоком Ψ_{11} и потоком Ψ_{12} , созданным вторым соленоидом. Второй соленоид пронизывается также собственным потоком Ψ_{22} и потоком Ψ_{21} , созданным первым соленоидом. Таким образом,

$$\Psi = \Psi_{11} + \Psi_{22} + \Psi_{12} + \Psi_{21}.$$

Собственные потоки всегда положительны:

$$\Psi_{11} = L_1 I, \quad \Psi_{22} = L_2 I.$$

«Чужие» потоки могут быть как положительными, так и отрицательными в зависимости от направления вектора магнитной индукции поля, созданного одним соленоидом в витках другого. При этом знаки магнитных потоков Ψ_{12} и Ψ_{21} всегда совпадают. Так как соленоиды соединены последовательно, то

$$\Psi_{21} = \Psi_{12} = \pm L_{21} I,$$

где коэффициент пропорциональности L_{21} называется взаимной индуктивностью второго и первого контура.

Смысл знаков определяется характером соединения и расположения соленоидов. Если магнитные поля соленоидов направлены в одну сторону (сонаправлены), то «чужие» потоки положительны: $\Psi_{21} = \Psi_{12} = +L_{12} I$, если поля направлены навстречу друг другу, то отрицательны: $\Psi_{21} = \Psi_{12} = -L_{12} I$.

Учитывая сказанное, для индуктивности системы двух соленоидов получаем

$$L = L_1 + L_2 \pm 2L_{12},$$

где знак «плюс» соответствует случаю сонаправленных полей, а «минус» – полям, направленным навстречу друг другу.

2. Взаимная индукция. Трансформатор

Явление взаимной индукции заключается в наведении ЭДС индукции в проводнике, находящемся вблизи цепи переменного тока.

Из закона электромагнитной индукции Фарадея следует, что ЭДС взаимной индукции равна

$$E_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt}, \quad (16.1)$$

где Φ_{21} – магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром II, обусловленный магнитным полем тока I_1 , протекающего в контуре I (рис. 16.1).

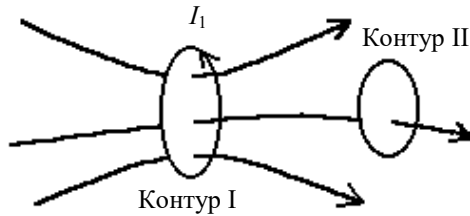


Рис. 16.1

Чем больше сила тока I_1 в контуре I, тем больше магнитный поток Φ_{21} , обусловленный этим током. Поэтому, так же как и при самоиндукции, этот магнитный поток пропорционален силе тока:

$$\Phi_{21} = L_{21}I_1, \quad (16.2)$$

где, как говорилось выше, коэффициент пропорциональности L_{21} называется взаимной индуктивностью (статической взаимной индуктивностью) II и I контура. Этот коэффициент зависит от геометрических размеров, формы, количества витков, взаимного расположения I и II контура, от магнитной проницаемости среды, в которой они находятся.

Если источник тока отключить от контура I и подключить контуру II, создав ток I_2 , то для магнитного потока через площадь контура I Φ_{12} можно записать аналогичную формулу:

$$\Phi_{12} = L_{12}I_2.$$

Пусть контуры находятся в неферромагнитной среде, тогда, как можно показать, для них выполняется так называемая теорема взаимности, согласно которой коэффициенты взаимной индуктивности равны друг другу численно и имеют одинаковые знаки:

$$L_{12} = L_{21}.$$

Если же среда ферромагнитная, причем режим перемагничивания среды выходит за пределы обратимого процесса, то L_{12} и L_{21} зависят не только от перечисленных выше параметров, но и от величины токов в контурах. В этом случае теорема взаимности не выполняется.

Заменив в законе Фарадея (16.1) магнитный поток его выражением (16.2) и полагая $L_{21} = \text{const}$, получим

$$E_2 = -\frac{d(L_{21}I_1)}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}. \quad (16.3)$$

Если контуры I и II находятся в ферромагнитной среде, то можно пользоваться формулой, по виду аналогичной формуле (16.3):

$$E_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21\text{дин}} \frac{dI_1}{dt}, \quad (16.4)$$

где $L_{21\text{дин}} = \frac{d\Phi_{21}}{dI_1}$ – так называемая динамическая взаимная индуктивность II и I контура.

На явлении взаимной индукции основано действие **трансформаторов**, которые применяются для повышения или понижения напряжения переменного электрического тока.

Трансформатор (рис. 16.2) состоит из двух или нескольких соленоидальных обмоток, расположенных близко друг от друга и чаще всего закрепленных на общем ферромагнитном сердечнике. Концы первичной обмотки присоединены к источнику переменного тока, а концы вторичной обмотки включены в цепь потребителя электрической энергии.

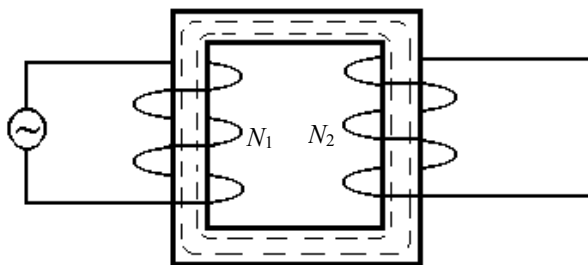


Рис. 16.2

Переменное магнитное поле тока I_1 , протекающего в первичной обмотке трансформатора, вызывает появление ЭДС взаимной индукции во вторичной обмотке. Магнитное поле первичной обмотки практически полностью локализовано в ферромагнитном сердечнике, играющем

роль магнитной цепи. Поэтому применение в трансформаторе такого замкнутого сердечника, общего для обеих обмоток, позволяет резко увеличить магнитный поток взаимной индукции и взаимную индуктивность.

Определим статическую и динамическую взаимные индуктивности обмоток трансформатора.

Пусть Φ – магнитный поток в сердечнике. Тогда магнитный поток через N_2 витков вторичной обмотки равен

$$\Phi_{21} = N_2 \Phi.$$

Следовательно, из формул (16.2) и (16.4) получим:

$$L_{21} = N_2 \frac{\Phi}{I_1}, \quad L_{21\text{дин}} = N_2 \frac{d\Phi}{dI_1}. \quad (16.5)$$

Статическая и динамическая индуктивности первичной обмотки трансформатора **в режиме холостого хода**, соответствующего разомкнутому состоянию вторичной цепи ($I_2 = 0$), равны:

$$L_1 = N_1 \frac{\Phi}{I_1}, \quad L_{1\text{дин}} = N_1 \frac{d\Phi}{dI_1}. \quad (16.6)$$

ЭДС самоиндукции в первичной обмотке можно выразить формулой

$$E_1 = L_{1\text{дин}} \frac{dI_1}{dt}.$$

Найдем отношение абсолютных значений напряжений U_1 и U_2 на концах первичной и вторичной обмотки при холостом ходе, называемое **коэффициентом трансформации**.

При разомкнутой вторичной обмотке (холостой ход) $I_2 = 0$. В этом случае напряжение на ее концах численно равно ЭДС взаимной индукции E_2 :

$$U_2 = E_2 = -L_{21\text{дин}} \frac{dI_1}{dt}. \quad (16.7)$$

На концах первичной обмотки напряжение U_1 , как можно показать с помощью закона Ома, равно

$$U_1 = E - I_1 r, \quad (16.8)$$

где E – ЭДС источника тока; r – внутреннее сопротивление источника тока, подключенного к первичной обмотке трансформатора.

Сила тока в первичной обмотке согласно закону Ома для замкнутой цепи определяется формулой

$$I_1 = \frac{E + E_1}{R_1 + r},$$

где E_1 – ЭДС самоиндукции в первичной обмотке; R_1 – сопротивление первичной обмотки.

Выражая E и подставляя в (16.8), получаем

$$U_1 = I_1 R_1 - E_1 = I_1 R_1 + L_{1\text{дин}} \frac{dI_1}{dt}.$$

Как правило, для трансформаторов первый член в правой части пренебрежимо мал по сравнению со вторым. Поэтому приближенно можно считать, что

$$U_1 = L_{1\text{дин}} \frac{dI_1}{dt}. \quad (16.9)$$

Зная U_2 и U_1 , используя формулы (16.5)–(16.7), (16.9), находим коэффициент трансформации

$$\left| \frac{U_1}{U_2} \right| = \frac{L_{1\text{дин}}}{L_{2\text{дин}}} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (16.10)$$

ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Измерьте индуктивность системы двух намотанных друг на друга соленоидов при совпадающем (рис. 16.3) и встречном (рис. 16.4) направлении токов, пользуясь любым из двух методов, описанных в лабораторной работе № 15. Объясните полученные результаты.

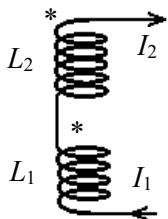


Рис. 16.3

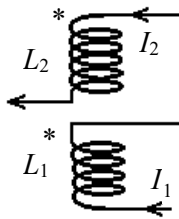


Рис. 16.4

2. Подключите звуковой генератор к соленоиду L_1 , который будет играть роль первичной обмотки трансформатора, и подайте на него переменное напряжение некоторой частоты. При этом соленоид L_2 , намотанный на общий каркас с соленоидом L_1 , будет вторичной обмоткой.

3. Измерьте с помощью осциллографа (см. приложение) амплитудные значения напряжения на концах первичной и разомкнутой (режим холостого хода) вторичной обмотки. Вычислите коэффициент трансформации по формуле (16.10) как отношение измеренных напряжений. Проверьте, близко ли полученное значение коэффициента трансформации к отношению количества витков в обмотках.

4. Проведите измерения коэффициента трансформации для трансформатора с ферромагнитным сердечником.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Милковская Л.Б. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1964. – Т. 2.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1978. – Т. 2 (и последующие издания этого курса).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 19

ИЗУЧЕНИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Цель работы: изучить магнитные свойства и основные параметры ферромагнетиков.

СТРУКТУРА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ И ПРИРОДА ФЕРРОМАГНЕТИЗМА

Изучение этих вопросов связано со значительными трудностями, так как природа ферромагнетизма не раскрывается классической физикой, а объясняется только квантовой физикой, с которой студенты на этапе выполнения работы не знакомы. Поэтому при изучении литературы [1] студентам рекомендуется особое внимание обратить на следующие основные положения.

1. Ферромагнетиками называются кристаллические вещества, состоящие из макроскопических, но небольших по объему ($10^{-6} \dots 10^{-3} \text{ мм}^3$) областей **спонтанной намагниченности** – доменов.

В пределах своих границ каждый домен намагничен однородно и до насыщения. В любом кристаллике (зерне) поликристаллического ферромагнитного образца (рис. 19.1) магнитные моменты **соседних доменов** ориентируются по одной из «осей легкого намагничивания» кристаллика во взаимно противоположных направлениях.

В целом же в кристаллическом образце магнитные моменты доменов ориентируются равновероятно по всем направлениям. Образец оказывается ненамагниченным, и это его состояние устойчиво. Оно соответствует минимуму энергии образца, складывающейся из энергии магнитного

поля всех доменов и энергии взаимодействия электронов соседних атомов кристаллической решетки при их ковалентной связи друг с другом.

2. Природа спонтанной намагниченности доменов – квантовая, т. е. объясняется квантовой физической теорией.

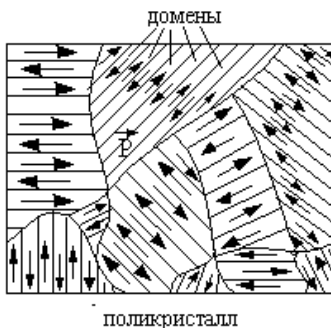


Рис. 19.1

Все электроны обладают спиновыми (собственными) магнитными моментами $\vec{\mu}_S$, т. е. способны определенным образом ориентироваться в пространстве, например вследствие взаимного влияния или под действием внешнего магнитного поля. Отметим, что $\mu_S = 1,6 \cdot 10^{-23}$ Дж/Тл (1 Дж/Тл = 1 А · м²). Атомы ферромагнетиков имеют недостроенную, не полностью занятую электронами внутреннюю оболочку. Так, у атомов железа, содержащих электроны на четырех оболочках, первая и вторая из них заняты полностью, третья, внутренняя оболочка из 18 возможных имеет только 14 электронов, внешняя оболочка содержит два валентных электрона (рис. 19.2). Электроны в каждой оболочке **отдельно взятого атома** попарно имеют антипараллельную ориентацию собственных магнитных моментов, обеспечивая нулевой результирующий спиновый магнитный момент атомов $\vec{P}_S = \sum \vec{\mu}_S = 0$.

В процессе кристаллизации ферромагнетика магнитные моменты $\vec{\mu}_S$ части электронов недостроенных внутренних оболочек в результате их **взаимодействия** ориентируются строго параллельно друг другу и «оси легкого намагничивания» образующегося кристаллика, как показано на рис. 19.2. В итоге возникают результирующие спиновые магнитные моменты $\vec{P}_S = 4\vec{\mu}_S$ атомов кристаллической решетки (рис. 19.3),

образующие в совокупности магнитный момент домена $\vec{P}_d = \sum \vec{P}_s$, намагниченность которого $\vec{I} = \vec{P}_d / V_d$ (где V_d – объем домена) равна по порядку величины $10^7 \dots 10^9$ А/м. Этот процесс протекает спонтанно и одновременно с обобществлением валентных электронов (оболочка 4) соседних атомов кристалла.

Взаимно параллельная ориентация магнитных моментов $\vec{\mu}_s$ сопровождается уменьшением энергии взаимодействия электронов соседних атомов («обменной энергии» E_0). Она тем меньше, чем больше объем V_d домена. Однако с возрастанием объема домена увеличивается его магнитный момент и, следовательно, энергия магнитного поля E_m домена. Минимальная **суммарная энергия** E_{\min} получается при некотором фиксированном, устойчивом объеме домена V_d , как показано на рис. 19.4.

Этому же условию способствует **деление кристалликов (зерен) ферромагнетика на домены** с антипараллельной ориентацией магнитных моментов \vec{P}_d (см. рис. 19.1). Магнитная энергия кристалла при таком делении резко уменьшается, а обменная энергия увеличивается в значительно меньшей степени. Ее увеличение происходит на объемных

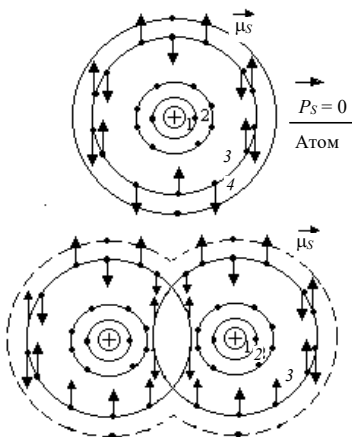


Рис. 19.2

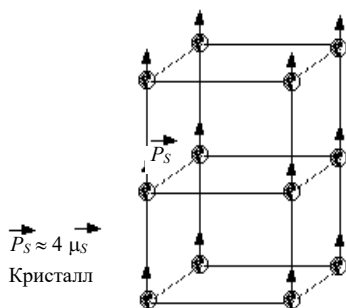


Рис. 19.3

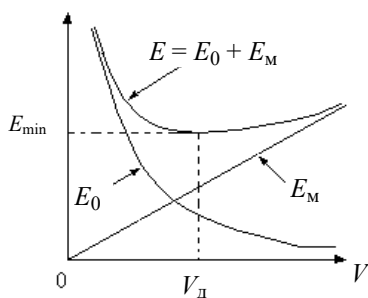


Рис. 19.4

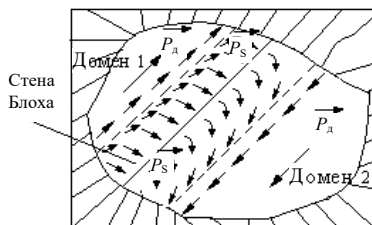


Рис. 19.5

границах («стенках Блоха») между доменами вследствие постепенной переориентации спиновых магнитных моментов атомов, как показано на рис. 19.5. Еще большему уменьшению свободной энергии поликристаллических ферромагнетиков способствует произвольная ориентация доменов, относящихся к разным зернам образца (см. рис. 19.1).

КРИВАЯ НАЧАЛЬНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА

При изучении литературы [2] студенту следует уяснить сущность процесса **технического намагничивания** ферромагнетика, основные особенности которого состоят в следующем.

1. При размещении ненамагниченного ферромагнетика (поликристаллического образца) во внешнем магнитном поле, например в поле соленоида с током, происходит его принудительное, или «техническое», намагничивание, при котором все домены образца полностью или частично ориентируются в направлении напряженности \vec{H} намагничивающего поля, как показано на рис. 19.6 ($H_1 < H_2 < H_3$). В ферромагнитном образце магнитное поле характеризуется индукцией \vec{B} , причем зависимость $B = f_1(H)$ – нелинейная и в общем случае неоднозначная. **Только процесс начального технического намагничивания** ферромагнетика может быть выражен зависимостью $B = \mu_0 \mu H$, где μ_0 – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость вещества, зависящая от напряженности намагничивающего поля: $\mu = f_2(H)$.

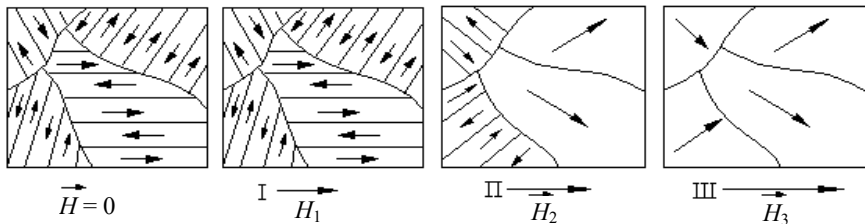


Рис. 19.6

На рис. 19.7 показана **кривая начального намагничивания** (сплошная линия). Три характерных участка кривой соответствуют рис. 19.6.

На участке I с увеличением напряженности поля происходит **обратимое** смещение границ и увеличение объема тех доменов, ориентация магнитных моментов которых близка к направлению намагничивающего поля \vec{H} . Соседние домены, магнитные моменты \vec{P} которых направлены под тупым углом к направлению поля \vec{H} , уменьшаются. На участке II этот процесс становится интенсивным, скачкообразным (эффект Баркгаузена) и **необратимым**.

При скачкообразном изменении индукции поля внутри кристаллов возникают вихревые токи, нагревающие вещество, вследствие чего теряется энергия намагничивающего поля. Часть ее преобразуется, кроме того, в энергию возникающих звуковых волн. В конце участка II большинство доменов, поглотив соседние, оказывается сориентированным по осям легкого намагничивания кристаллов, близких по направлению к полю \vec{H} . На участке III сильное намагничивающее поле вызывает процесс медленного и монотонного вращения доменов до направления, совпадающего с направлением поля \vec{H} . В результате наступает **состояние насыщения** намагненности ферромагнетика (H_s, B_s). Дальнейшее увеличение индукции \vec{B} не зависит от его свойств и связано только с ростом \vec{H} .

2. Магнитная проницаемость $\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H}$, как видно из кривой начального намагничивания, возрастает в слабых полях от некоторого начального значения μ_n до максимального значения $\mu_{\max} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_0}{H_0}$ при $H = H_0$, как показано на рис. 19.8.

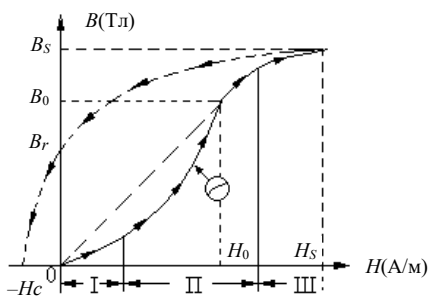


Рис. 19.7

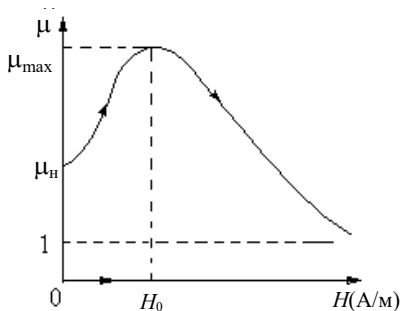


Рис. 19.8

При дальнейшем увеличении намагничивающего поля магнитная проницаемость уменьшается, асимптотически приближаясь к значению $\mu = 1$, когда ферромагнетик практически не влияет на магнитное поле в занимаемом им объеме. Само понятие «магнитная проницаемость» для ферромагнетика применимо только к «кривой начального намагничивания».

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА С ПОМОЩЬЮ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА НА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

1. При уменьшении напряженности намагничивающего поля до нуля намагниченный ферромагнетик размагничивается лишь частично вследствие необратимых процессов (см. рис. 19.7). При $H = 0$ поле ферромагнетика характеризуется **остаточной магнитной индукцией** B_r . Отставание индукции B от напряженности H при уменьшении напряженности называется «магнитным гистерезисом».

2. В намагничивающем поле **обратного направления** путем изменения его напряженности от $H = 0$ до $H = -H_c$ остаточную индукцию можно сделать равной нулю, т. е. размагнитить образец (см. рис. 19.7). Значение напряженности такого поля H_c называется **коэрцитивной силой ферромагнетика**. Она показывает, как сильно удерживается ферромагнетиком остаточная индукция.

3. Ферромагнетики, у которых $H_c < 80$ А/м, называются **мягкими**. Эти материалы (железо, электротехническая сталь, сплавы железа с никелем – «пермаллой») имеют большую магнитную проницаемость ($\mu_{\max} = 5000 \dots 50\,000$ и более) и применяются для изготовления сердечников трансформаторов и электрических машин. Ферромагнетики, имеющие $H_c > 4000$ А/м, называются **жесткими** и применяются для изготовления постоянных магнитов (сплавы железа типа «Алнико» и «Магнико») [2].

4. При перемагничивании ферромагнетиков в переменном магнитном поле $H = f(t)$ процесс изменения магнитной индукции поля B в образце запаздывает. Это приводит к тому, что график зависимости $B(H)$ имеет вид симметричной замкнутой кривой, которая называется **петлей гистерезиса** (рис. 19.9). Если амплитуда напряженности поля заходит в область насыщения намагниченности образца, петля гистерезиса называется **предельной**, в остальных случаях – **петлей основного цикла** (основная петля гистерезиса). Нелинейность петли показывает, что **индукция поля в ферромагнетике изменяется со временем не так, как изменяется напряженность**. При исследованиях ферромагнетики перемагничивают в «режиме синусоидальной индукции» $B = B_m \sin \omega t$ поля в образце, при котором напряженность поля изменяется по закону $H = f(t)$ резко искаженной синусоиды (рис. 19.9).

Две ветви петли гистерезиса означают, что любому значению H соответствуют для этой петли два значения магнитной индукции B , зависящие от предыстории магнитного состояния образца.

Кривая, проведенная через вершины (B_m, H_m) ряда основных петель гистерезиса, практически совпадает с «кривой начального намагничивания». Поэтому магнитная проницаемость ферромагнетика может быть определена через эти максимальные значения B_m и H_m , относящиеся к любой из основных петель гистерезиса (рис. 19.9), по формуле

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_m}{H_m}, \quad (19.1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

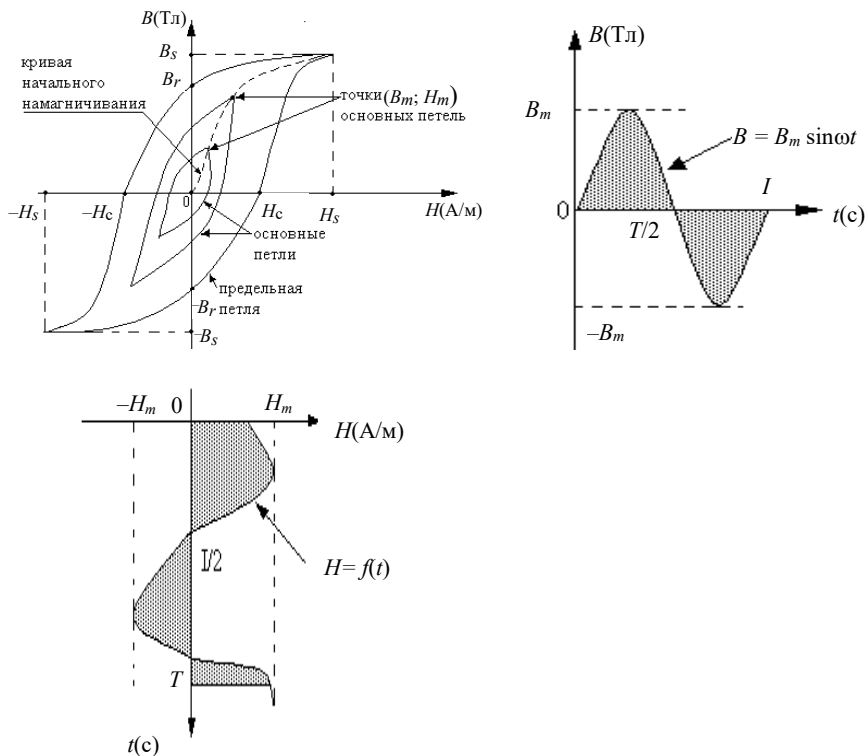


Рис. 19.9

5. Энергия гистерезисных потерь, расходуемая за один полный цикл перемагничивания какого-либо образца, равна произведению объема образца V_0 и площади петли гистерезиса в координатах (B, H) [1], т. е.

$$W = V_0 \oint H dB. \quad (19.2)$$

Она переходит в тепловую энергию образца. При перемагничивании ферромагнетик нагревается.

6. Полностью размагнитить ферромагнетик можно, перемагничивая его в переменном магнитном поле при плавном уменьшении амплитуды напряженности поля от значения H_s , соответствующего состоянию магнитного насыщения, до нуля в течение ряда циклов.

СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

1. Для определения параметров ферромагнетика используется петля гистерезиса, которая наблюдается на экране осциллографа при перемагничивании данного ферромагнитного образца внешним переменным магнитным полем.

Схема измерительной установки показана на рис. 19.10. Она содержит следующие элементы: генератор переменного напряжения; $\Phi\text{О}$ – ферромагнитный образец (сердечник трансформатора); N_1 – намагничивающая обмотка; N_2 – измерительная обмотка; R и C – резистор и конденсатор RC -цепочки; R_1 – резистор для получения напряжения U_x ; электронный или цифровой осциллограф (см. приложение).

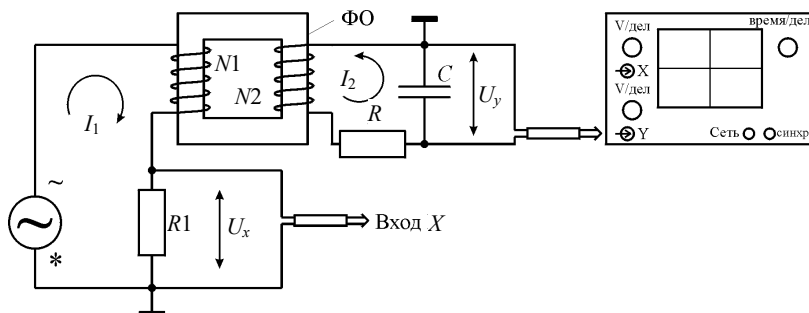


Рис. 19.10

2. В соответствии с показанной на рис. 19.10 схемой на вход Y осциллографа подается напряжение U_y , пропорциональное магнитной индукции B поля в исследуемом образце, на вход X – напряжение U_x , пропорциональное напряженности H поля, намагничивающего образец (внутренний генератор горизонтальной развертки луча осциллографа при этом выключается). За один период T изменения напряжений U_x и U_y , характеризующий полный цикл перемагничивания образца, электронный луч на экране осциллографа описывает петлю гистерезиса, повторяя ее в точности за каждый следующий период. Поэтому изображение петли гистерезиса на экране будет неподвижным.

Петля гистерезиса изображается на экране в координатах (x, y) , причем

$$U_x = K_x C; \quad U_y = K_y Y, \quad (19.3)$$

где X и Y – измеряются в «делениях шкалы» экрана осциллографа; K_x (В/дел) и K_y (В/дел) – масштабные коэффициенты, значения которых указываются либо около ручек электронного осциллографа, либо на экране цифрового осциллографа.

3. Напряжение U_x , пропорциональное напряженности H магнитного поля, получают следующим образом. Если образец выполнен в виде однородного замкнутого сердечника, на котором равномерно распределена первичная (намагничивающая) обмотка с числом витков N_1 , то ток I_1 в этой обмотке и напряженность H создаваемого им поля связаны соотношением

$$H = \frac{N_1}{l} I_1,$$

где l – средняя длина сердечника (ферромагнитного образца).

Последовательно с обмоткой N_1 включен резистор R_1 , на котором создается падение напряжения

$$U_x = I_1 R_1 = \frac{l R_1}{N_1} H. \quad (19.4)$$

Сопротивление R_1 мало. Этим обеспечивается режим перемагничивания, при котором ток $I_1(t)$ и напряженность $H(t)$ несинусоидальны, но синусоидальна магнитная индукция $B = B_m \sin \omega t$ (при синусоидальном напряжении генератора, питающего схему).

Из (19.3) и (19.4) получаем простую формулу для измерения напряженности магнитного поля в образце:

$$H = \alpha X, \quad (19.5)$$

где $\alpha = \frac{K_x N_1}{l R_1}$.

4. Напряжение U_y , пропорциональное магнитной индукции B поля в образце, получают следующим образом. Вторичная (измерительная) обмотка, нанесенная на образец и имеющая N_2 витков, пронизывается сосредоточенным в ферромагнитном образце магнитным потоком $\Phi = BS$, где S – площадь поперечного сечения образца. В этой обмотке индуцируется ЭДС,

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt},$$

создающая ток силой I_2 и напряжение $U_2 \approx -\varepsilon_2$ на выходе обмотки (падение напряжения на самой обмотке пренебрежимо мало). Отсюда следует, что $U_2 dt \approx \varepsilon_2 dt = N_2 S dB$ и что

$$\int U_2 dt = N_2 SB. \quad (19.6)$$

Из (19.6) видно, что интегрированием переменного напряжения (в нашем случае – синусоидального, изменяющегося с частотой $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$, задаваемой генератором), можно получить сигнал, пропорциональный мгновенному значению $B(t)$ индукции магнитного поля в образце. Эта операция в схеме на рис. 19.6 выполняется «интегрирующей RC-цепочкой», состоящей из резистора R и конденсатора C .

Напряжение U_2 создает в RC-цепочке ток I_2 и переменный заряд конденсатора, равный $q = \int I_2 dt$, вследствие чего на конденсаторе появляется напряжение

$$U_y = \frac{1}{C} \int I_2 dt, \quad (19.7)$$

которое подается на вход Y осциллографа (влиянием большого входного сопротивления осциллографа пренебрегаем).

Сопротивление RC-цепочки синусоидальному току с частотой

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

где T – период колебаний тока, равно

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = R \sqrt{1 + \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{T}{\tau}\right)^2},$$

где $\tau = RC$ – «постоянная времени» RC -цепочки. При обычно выбираемом значении отношения $30 < \frac{\tau}{T} < 100$ сопротивление $Z \approx R$, т. е. практически чисто активное, не создающее заметного сдвига фаз между током I_2 и напряжением U_2 . В этом случае для **мгновенных значений** тока и напряжения справедлив закон Ома

$$I_2 \approx \frac{U_2}{Z} \approx \frac{U_2}{R}.$$

Это обстоятельство с учетом формул (19.6) и (19.7) позволяет записать для мгновенных значений напряжений U_2 и U_y и магнитной индукции B следующую зависимость:

$$U_y = \frac{1}{RC} \int U_2 dt = \frac{N_2 S}{RC} B. \quad (19.8)$$

Отметим, что увеличение $\tau = RC$ делает формулу (19.8) более точной, т. е. повышает точность интегрирования, но одновременно приводит к уменьшению напряжения U_y .

Из (19.3) и (19.8) получаем простую формулу для измерения индукции магнитного поля в образце:

$$B = \beta Y, \quad (19.9)$$

где $\beta = \frac{K_y RC}{N_2 S}.$

5. Формулу для определения мощности $P = \frac{W}{T} = W\nu$, расходуемой за один цикл $T = 1/\nu$ на перемагничивание ферромагнитного образца, найдем, используя (19.2), (19.5), (19.9), в следующем виде:

$$P = \chi S_r, \quad (19.10)$$

где $\chi = K_x K_y \frac{v N_1 R C}{N_2 R_1}$; $S_r = \oint X dY$ – площадь петли гистерезиса на экране осциллографа (в координатах x, y), измеряемая в квадратных делениях шкалы экрана осциллографа.

ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Соберите схему установки, показанную на рис. 19.10; после проверки схемы преподавателем включите осциллограф и источник питания схемы.

2. Установите максимальное выходное напряжение генератора ГН.

3. Получите на экране осциллографа изображение петли гистерезиса и установите его симметрично относительно оси X и Y на шкале экрана.

3. Масштабный коэффициент K_y осциллографа выберите таким, чтобы петля гистерезиса занимала всю площадь экрана.

4. Рассчитайте коэффициенты α , β , χ , содержащиеся в формулах (19.5), (19.9) и (19.10) соответственно.

5. Измерьте координаты X_c и Y_r пересечения петли гистерезиса с осями координат на шкале экрана и по формулам (19.5) и (19.9) вычислите коэрцитивную силу H_c и остаточную индукцию B_r ферромагнитного образца.

6. Измерьте в квадратных делениях шкалы осциллографа площадь петли гистерезиса и по формуле (19.10) вычислите мощность, расходуемую на перемагничивание ферромагнитного образца.

7. Измерьте координаты X_m и Y_m петли гистерезиса и по формулам (19.1), (19.5) и (19.9) вычислите соответствующие значения H_m , B_m (см. рис. 19.9). Данные занесите в таблицу.

8. Устанавливая поочередно другие значения напряжения генератора ГН, получите соответствующие им петли гистерезиса и выполните измерения и вычисления, аналогичные п. 7. Данные занесите в таблицу.

9. Используя данные таблицы, постройте график зависимости $B_m = f(H_m)$ – кривую начального намагничивания, а по этой кривой – график зависимости $\mu = f(H)$. Запишите максимальное значение μ для исследованного ферромагнитного образца и соответствующее значение напряженности магнитного поля H_0 .

10. По результатам работы сделайте выводы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1978. – Т. 2 (и последующие издания этого курса).
2. *Калашиников С.Г.* Электричество. – М.: Наука, 1977.
3. *Епифанов Г.И.* Физика твердого тела. – М.: Наука, 1965 (и последующие издания этого курса).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

ВВЕДЕНИЕ

Ниже приведены вопросы, которые могут быть заданы студентам во время защиты лабораторных работ по разделу «Электричество и магнетизм». Вопросы разделены по уровню сложности на три группы.

Вопросы первого уровня сложности требуют от студента знания основных понятий, определений физических величин и формулировок физических законов. Для успешной защиты на первом уровне студент должен правильно ответить на три указанных преподавателем вопроса этого уровня. Максимальный балл, который преподаватель может начислить студенту за защиту на первом уровне, соответствует оценке «удовлетворительно».

Вопросы второго уровня сложности требуют от студента знания сути изучаемых физических явлений и процессов, особенностей проводимого физического эксперимента. Для успешной защиты на втором уровне студент должен правильно ответить на один вопрос второго уровня сложности и на три вопроса первого уровня. Максимальный балл, который преподаватель может начислить студенту за защиту на втором уровне, соответствует оценке «хорошо».

Вопросы третьего уровня сложности требуют от студента знания теории и умения использовать ее для объяснения и математического описания изучаемых явлений и процессов. Для успешной защиты на третьем уровне студент должен правильно ответить на один вопрос третьего уровня сложности, один вопрос второго уровня и на три вопроса

первого уровня. Максимальный балл, который преподаватель может начислить студенту за защиту на третьем уровне, соответствует оценке «отлично».

Уровень сложности и соответственно возможный максимальный балл выбирается студентом. Реальный балл, начисляемый студенту, определяется преподавателем по итогам защиты лабораторной работы.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ

1. Назовите единицу измерения заряда в СИ.
2. Опишите основные свойства электрического заряда.
3. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
4. Что такое электрическое поле? Назовите силовую и энергетическую характеристику электрического поля.
5. Какое электрическое поле называют однородным?
6. Запишите закон Кулона в векторной форме. Как с его помощью определить направление кулоновской силы, действующей на точечный заряд?
7. Сформулируйте принцип суперпозиции применительно к кулоновской силе.
8. Дайте определение вектору напряженности электрического поля E .
9. Сформулируйте принцип суперпозиции для напряженности электрического поля E .
10. Дайте определения характеристикам зарядов, распределенных по нити, поверхности, объему.
11. Дайте определение потоку вектора напряженности.
12. Сформулируйте теорему Гаусса для электростатического поля в вакууме.
13. Напишите формулу для расчета напряженности электростатического поля бесконечной прямолинейной равномерно заряженной нити.
14. Напишите формулу для расчета напряженности электростатического поля бесконечной равномерно заряженной плоскости.

15. Напишите формулы для расчета напряженности электростатического поля внутри и вне равномерно заряженной сферы.
16. Дайте определение потенциалу электрического поля φ .
17. Сформулируйте принцип суперпозиции для потенциала электрического поля φ .
18. Чему равна работа электростатических сил по перемещению заряда? От чего она зависит?
19. Как связаны напряженность и потенциал?
20. Что такое электрический диполь? Дайте определение дипольного момента.
21. Чему равен момент пары сил, действующий на диполь в однородном электрическом поле?
22. Что такое силовые линии и эквипотенциальные поверхности электрического поля? Под каким углом они пересекаются?
23. Что такое силовые линии и эквипотенциальные поверхности электрического поля? Где начинаются и заканчиваются силовые линии электростатического поля?
24. Что такое силовые линии и эквипотенциальные поверхности электрического поля? Что характеризует густота силовых линий и эквипотенциальных поверхностей?
25. Какие вещества называются проводниками, а какие – диэлектриками?
26. Какие диэлектрики называют полярными, какие – неполярными?
27. Что такое поляризация диэлектрика?
28. Какие заряды называются связанными, какие – свободными?
29. Дайте определение вектора поляризованности P .
30. Как связаны векторы поляризованности P и напряженности E электрического поля в диэлектрике?
31. Почему напряженность E электрического поля внутри диэлектрика, помещенного в электрическое поле, отличается от напряженности внешнего поля? Ответ обоснуйте.
32. Дайте определение диэлектрической проницаемости.
33. Дайте определение вектору электрического смещения D .
34. Чем вызвана необходимость введения дополнительной характеристики электрического поля – D ?
35. Сформулируйте теорему Гаусса для электростатического поля в диэлектрике.

36. Чему равна напряженность поля внутри проводника, помещенного в электростатическое поле?

37. Как соотносятся потенциалы точек на поверхности и внутри проводника, помещенного в электростатическое поле?

ВТОРОЙ УРОВЕНЬ

1. Докажите теорему Гаусса для напряженности электрического поля в вакууме.

2. Рассчитайте напряженность поля бесконечной прямолинейной равномерно заряженной нити.

3. Рассчитайте напряженность поля бесконечной равномерно заряженной плоскости.

4. Рассчитайте напряженность поля внутри и вне равномерно заряженной сферы.

5. Получите выражение для расчета работы электростатических сил. Покажите, что эти силы консервативны.

6. Потенциал электростатического поля. Получите формулу для расчета потенциала поля точечного заряда в вакууме.

7. Почему картину эквипотенциальных поверхностей следует строить так, чтобы разность потенциалов между двумя любыми соседними эквипотенциальными поверхностями была одинаковой?

8. Как по полученной в опыте картине эквипотенциальных линий определить направление и численное значение вектора напряженности электрического поля E ?

9. Что такое диэлектрики? Классификация диэлектриков. Что такое поляризация диэлектриков и каковы особенности поляризации диэлектриков разных типов?

10. Рассчитайте напряженность поля в однородном диэлектрике. Раскройте физический смысл диэлектрической проницаемости диэлектрика.

11. Получите определение вектора электрического смещения. Сформулируйте теорему Гаусса для этого вектора.

12. Опишите поведение свободных носителей заряда в проводниках, помещенных в электрическое поле.

13. Чему равен избыточный заряд внутри заряженного проводника? Ответ обоснуйте.

14. Чему равна разность потенциалов между любыми двумя точками заряженного проводника, находящегося в равновесном состоянии? Ответ обоснуйте.

15. Что такое замкнутые проводящие оболочки? Объясните, для чего и как они используются.

16. Получите выражение для расчета энергии системы из нескольких точечных зарядов.

17. Получите выражение для расчета энергии заряженного проводника.

18. Получите выражение для расчета энергии заряженного конденсатора.

19. Получите выражение для расчета энергии электрического поля и ее объемной плотности.

ТРЕТИЙ УРОВЕНЬ

1. Докажите, что заряды каждого знака, индуцированные на проводнике поднесенным к нему зарядом q , всегда меньше q .

2. Заряд металлического шара радиусом R равен Q . Найдите зависимости напряженности и потенциала поля шара от расстояния до его центра.



3. Металлический шар радиусом R с зарядом Q помещен в однородный и изотропный диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ϵ . Найдите зависимости напряженности и потенциала поля шара от расстояния до его центра.

4. Металлический шар радиусом R_1 , несущий заряд Q , окружен расположенным концентрически полым металлическим шаром с внутренним радиусом R_2 и внешним радиусом R_3 . Заряд внешнего шара равен нулю. Постройте график зависимости напряженности поля E от расстояния r до центра шаров. Найдите потенциалы шаров, если в бесконечности потенциал равен нулю.

5. Металлический шар радиусом R с зарядом Q окружен сферическим слоем толщиной H . Диэлектрик однородный и изотропный с диэлектрической проницаемостью ϵ . Найдите зависимости напряженности и потенциала поля шара от расстояния до его центра.

6. Заряд плоского воздушного конденсатора равен Q . Площадь его пластин равна S , расстояние между ними равно d . В пространство между пластинами помещают вплотную к одной из обкладок металлическую пластину толщиной $d/2$. Найдите зависимость напряженности электрического поля между обкладками конденсатора от координаты.

7. Заряд плоского воздушного конденсатора равен Q . Площадь его пластин равна S , расстояние между ними равно d . В пространство между пластинами помещают вплотную к одной из обкладок диэлектрическую пластину толщиной $d/2$. Диэлектрическая проницаемость диэлектрика равна ϵ . Найдите зависимость напряженности электрического поля между обкладками конденсатора от координаты.

8. Заряд плоского конденсатора равен Q . Площадь его пластин равна S , расстояние между ними равно d . Пространство между пластинами заполнено двумя слоями диэлектрика толщиной $d/2$ каждый. Диэлектрические проницаемости диэлектриков равны ϵ_1 и ϵ_2 . Найдите зависимость напряженности электрического поля между обкладками конденсатора от координаты.

9. Найдите работу по перемещению точечного заряда q в поле металлического шара радиусом R с зарядом Q из точки, расположенной на расстоянии r_1 от центра шара в точку, расположенную на расстоянии r_2 . Считать, что заряд q достаточно мал и не влияет на распределение заряда Q по шару.

10. Найдите работу по перемещению точечного заряда q в поле диэлектрического шара радиусом R с зарядом Q из точки, расположенной на расстоянии r_1 от центра шара, в точку, расположенную на расстоянии r_2 . Считайте, что заряд Q равномерно распределен по объему шара. Диэлектрическая проницаемость диэлектрика равна ϵ .

ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 12

МЕТОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ

1. Что такое электрический ток? Каковы условия существования тока?
2. Что такое сила тока и плотность тока? Как они связаны между собой?
3. Что такое сторонние силы? Какова их особенность по сравнению с электростатическими силами? Приведите примеры таких сил.
4. Что такое разность потенциалов?
5. Что такое ЭДС?
6. Что такое напряжение (падение напряжения)?
7. Что такое однородный и неоднородный участок электрической цепи?
8. Сформулируйте закон Ома в интегральной форме для участка электрической цепи.
9. Сформулируйте закон Ома в дифференциальной форме для участка электрической цепи.
10. От чего зависит сопротивление однородного проводника?
11. Как рассчитывается общее сопротивление при последовательном и параллельном соединении проводников?
12. Сформулируйте и поясните первое правило Кирхгофа.
13. Сформулируйте и поясните второе правило Кирхгофа.

ВТОРОЙ УРОВЕНЬ

1. Как с помощью вольтметра измеряется напряжение на участке цепи?
2. Как с помощью амперметра измеряется сила тока на участке цепи?
3. Как с помощью вольтметра и амперметра можно измерить сопротивление участка электрической цепи? Какими должны быть сопротивления вольтметра и амперметра?

4. В чем заключается метод измерения сопротивления с помощью моста постоянного тока? Получите рабочую формулу для измеряемого сопротивления.

5. Объясните принцип работы осциллографа.

6. Как и какие характеристики электрического сигнала можно измерить с помощью осциллографа?

ТРЕТИЙ УРОВЕНЬ

1. Докажите, что наличия только электростатических сил недостаточно для поддержания постоянного тока в электрической цепи.

2. Используя закон Ома для участка цепи в интегральной форме, получите выражение закона в дифференциальной форме.

3. Используя закон Ома для участка цепи в дифференциальной форме, получите выражение закона в интегральной форме.

4. Почему при последовательном соединении проводников сила тока в них одинакова, а общее напряжение равно сумме напряжений на отдельных проводниках?

5. Почему при параллельном соединении проводников падение напряжения на них одно и то же, а общая сила тока равна сумме токов в отдельных проводниках?

ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 13

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ БАТАРЕИ ЭЛЕМЕНТОВ

ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ

1. Как рассчитать работу электростатических и сторонних сил по переносу электрического заряда?

2. Что такое работа тока?

3. Что такое мощность тока?

4. Что такое работа источника тока?

5. Что такое мощность источника тока?

6. Что такое полная мощность электрической цепи?

7. Что такое полезная мощность электрической цепи?

8. Что такое мощность потерь электрической цепи?
9. Сформулируйте закон Джоуля–Ленца в интегральной форме.
10. Сформулируйте закон Джоуля–Ленца в дифференциальной форме.
11. Как связана работа источника тока с работой тока на участках цепи?
12. Как связана полная мощность с полезной мощностью и мощностью потерь?
13. Что такое КПД источника тока?
14. Что такое ток короткого замыкания источника тока? От чего он зависит?

ВТОРОЙ УРОВЕНЬ

1. Изобразите электрическую схему лабораторной установки. Получите и проанализируйте зависимость полезной мощности от силы тока источника.
2. Изобразите электрическую схему лабораторной установки. Получите и проанализируйте зависимость мощности потерь от силы тока источника.
3. Изобразите электрическую схему лабораторной установки. Получите и проанализируйте зависимость полной мощности от силы тока источника.
4. Изобразите электрическую схему лабораторной установки. Получите и проанализируйте зависимость КПД источника от силы тока.
5. Изобразите электрическую схему лабораторной установки. Получите и проанализируйте зависимость напряжения на внешнем участке цепи от силы тока источника.
6. Изобразите электрическую схему лабораторной установки. Получите и проанализируйте зависимость полезной мощности от внешнего сопротивления.
7. Изобразите электрическую схему лабораторной установки. Получите и проанализируйте зависимость мощности потерь от внешнего сопротивления.
8. Изобразите электрическую схему лабораторной установки. Получите и проанализируйте зависимость полной мощности от внешнего сопротивления.

9. Изобразите электрическую схему лабораторной установки. Получите и проанализируйте зависимость КПД источника от внешнего сопротивления.

10. Изобразите электрическую схему лабораторной установки. Получите и проанализируйте зависимость напряжения на внешнем участке цепи от внешнего сопротивления.

ТРЕТИЙ УРОВЕНЬ

1. Используя закон Джоуля–Ленца в интегральной форме, получите выражение закона в дифференциальной форме.

2. Используя закон Джоуля–Ленца в дифференциальной форме, получите выражение закона в интегральной форме.

3. Объясните механизм выделения тепла при протекании электрического тока в проводнике.

4. Сравните выражение для работы тока на участке цепи с выражением для количества теплоты, выделяемой на участке. Объясните результат.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ

1. Что такое удельный заряд электрона?

2. Что такое термоэлектронная эмиссия?

3. Что такое сила Лоренца? Как определяется ее величина и направление?

4. Как направлено магнитное поле, создаваемое соленоидом внутри магнетрона?

5. Какие силы действуют на электрон, движущийся в магнетроне? Куда они направлены?

6. Как движутся электроны в магнетроне в отсутствие магнитного поля и при его наличии?

7. Как изменяется траектория электрона при увеличении магнитного поля?
8. Что такое критическая траектория электрона?
9. Что такое критическое значение индукции магнитного поля?
10. Изобразите график зависимости тока магнетрона от индукции внешнего магнитного поля и объясните его особенности.
11. Почему ток магнетрона зависит от тока соленоида?

ВТОРОЙ УРОВЕНЬ

1. Как устроен магнетрон, используемый в лабораторной работе?
2. Изобразите электрическую схему лабораторной установки. Опишите принцип ее действия.
3. Опишите методику проведения эксперимента.
4. Как, пользуясь графиком экспериментальной зависимости тока магнетрона от тока соленоида, определить критическое значение магнитной индукции?

ТРЕТИЙ УРОВЕНЬ

1. Выведите рабочую формулу для расчета удельного заряда электрона.
2. Получите и поясните зависимость критического значения магнитной индукции от анодного напряжения.
3. Получите и поясните зависимость критического значения магнитной индукции от радиуса анода магнетрона.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 15

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СОЛЕНОИДА

ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ

1. Что является источником магнитного поля?
2. Что такое поток вектора магнитной индукции (магнитный поток)? В каком случае он называется собственным?

3. Что такое индуктивность контура? От чего она зависит?
4. При каком условии магнитное поле реального соленоида можно считать близким к полю бесконечно длинного соленоида?
5. Что такое явление электромагнитной индукции?
6. Почему при движении проводника в магнитном поле в нем возникает ЭДС индукции?
7. Почему в неподвижном контуре, который помещен в переменное магнитное поле, возникает ЭДС индукции?
8. Запишите закон Фарадея для ЭДС индукции. Дайте определение входящим в него физическим величинам.
9. Что такое явление самоиндукции?
10. Запишите закон Фарадея для ЭДС самоиндукции, считая индуктивность постоянной. Дайте определение входящим в него физическим величинам.
11. Сформулируйте правило Ленца. Приведите пример использования правила.
12. Из каких элементов состоит колебательный контур? Что в нем совершает колебания?
13. Как создать в контуре вынужденные колебания?
14. Что такое активное, емкостное и индуктивное сопротивление? Как можно их вычислить?

ВТОРОЙ УРОВЕНЬ

1. Поясните, как в эксперименте осуществляется подключение и отключение источника ЭДС к RL -контуре. Как при этом зависит от времени сила тока в RL -контуре?
2. Что такое время релаксации и от чего оно зависит? Покажите это время на графике зависимости силы тока в RL -контуре от времени.
3. Почему определение индуктивности L нельзя считать точным, если опыт проведен только с одним активным сопротивлением R_1 ?
4. Что нужно сделать, чтобы повысить точность определения индуктивности L способом подключения и отключения источника? Как это осуществить экспериментально?
5. Объясните, как определить индуктивность контура, используя созданные в нем вынужденные электромагнитные колебания.
6. Поясните, почему при повышении частоты вынужденных колебаний в RL -контуре точность измерения индуктивности L повышается.

7. Как учесть заранее неизвестное активное сопротивление звукового генератора и проводов при определении индуктивности L методом создания в контуре вынужденных электромагнитных колебаний?

ТРЕТИЙ УРОВЕНЬ

1. Как можно определить направление индукционного тока в контуре только с помощью закона Фарадея (не используя правило Ленца)? Приведите пример.

2. Получите выражение для индуктивности бесконечного соленоида через его параметры.

3. Получите закон Фарадея, решив задачу о движении проводника в однородном магнитном поле.

4. Получите зависимость силы тока в RL -контуре от времени при подключении контура к источнику постоянной ЭДС.

5. Получите зависимость силы тока в RL -контуре от времени при отключении контура от источника постоянной ЭДС.

6. Вы определили экспериментальную зависимость силы тока от времени при отключении источника. Как, используя два значения силы тока из этой зависимости, рассчитать индуктивность контура? Получите формулу.

7. Получите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний заряда в последовательном RLC -контуре и решите его.

8. Получите связь между амплитудными значениями силы тока и ЭДС генератора, создающего вынужденные колебания в последовательном RLC -контуре. Получите из нее формулу для определения индуктивности в RL -контуре.

9. Всегда ли силовые линии магнитного поля являются замкнутыми?

ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 16

ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ, ТРАНСФОРМАТОР

ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ

1. Что такое общий магнитный поток (потокосцепление) через витки уединенного соленоида и через витки двух близко расположенных соленоидов?
2. Что такое индуктивность (коэффициент самоиндукции) соленоида? Что такое взаимная индуктивность (коэффициент взаимной индукции) двух соленоидов?
3. Чему равна индуктивность системы двух магнитосвязанных соленоидов?
4. Что утверждает теорема взаимности? При каких условиях она выполняется? При каких не выполняется?
5. Запишите и поясните закон Фарадея для ЭДС взаимной индукции.
6. Объясните, когда индуктивность не зависит от силы тока и когда зависит.
7. В каких случаях приходится пользоваться понятием «динамическая взаимная индуктивность»?
8. Как устроен трансформатор? В чем заключается принцип его работы?
9. Что такое режим «холостого хода» трансформатора?
10. Что такое коэффициент трансформации?

ВТОРОЙ УРОВЕНЬ

1. Объясните, почему индуктивность уединенного соленоида не зависит от направления тока в нем, а индуктивность двух магнитосвязанных соленоидов существенно изменяется, если направление тока в одном из них поменять.
2. Как опытным путем определить коэффициент взаимной индукции?
3. При каких условиях коэффициент взаимной индукции первого соленоида по отношению ко второму равен по величине и знаку коэффициенту взаимной индукции второго соленоида по отношению к первому?

4. Почему в качестве сердечника трансформатора используют ферромагнетики?

5. Какой ферромагнетик следует выбирать для сердечника трансформатора с большой или малой величиной коэрцитивной силы? Ответ поясните.

ТРЕТИЙ УРОВЕНЬ

1. Получите формулу, выражающую индуктивность системы двух магнитно-связанных соленоидов через коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции.

2. Может ли индуктивность системы двух магнитно-связанных соленоидов быть равной нулю, если индуктивность каждого соленоида нулю не равна? Ответ обоснуйте.

3. Во сколько раз индуктивность системы двух магнитно-связанных соленоидов может быть больше индуктивности каждого из соленоидов, входящих в систему? Ответ обоснуйте.

4. Докажите, что отношение напряжений на концах вторичной и первичной обмотки трансформатора приблизительно равно отношению числа витков этих обмоток.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 19

ИЗУЧЕНИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ

1. Что такое магнетики? Какие виды магнетиков существуют?

2. Что такое намагниченность?

3. Что такое магнитная проницаемость?

4. Что такое магнитомеханические явления? Что возникает в магнетике за счет прецессии электронных орбит?

5. Как в постоянном магнитном поле проявляют себя диамагнетики?

6. Как в постоянном магнитном поле проявляют себя парамагнетики?
7. Как в постоянном магнитном поле проявляют себя ферромагнетики?
8. Что такое домен?
9. Что такое спонтанная намагниченность?
10. Поясните фразу «домен намагничен однородно».
11. Поясните фразу «домен намагничен до насыщения».
12. Как ориентированы магнитные моменты соседних доменов в ненамагниченном ферромагнетике?
13. За счет чего возникает намагниченность домена?
14. Что такое электронная оболочка атома?
15. Что такое внутренняя недостроенная электронная оболочка атома?
16. Что такое температура Кюри?
17. Нарисуйте график зависимости индукции магнитного поля в ферромагнетике от напряженности внешнего магнитного поля для начального намагничивания ферромагнетика. Укажите на нем границы этапов намагничивания.
18. Нарисуйте график зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля для начального намагничивания ферромагнетика.
19. В чем заключается явление гистерезиса для ферромагнетиков?
20. Изобразите петлю гистерезиса для ферромагнетика. Поясните ее особенности.
21. Что такое остаточная намагниченность ферромагнетика? Как ее можно обнаружить?
22. Что такое коэрцитивная сила ферромагнетика?
23. Что такое магнитно-мягкие ферромагнетики? Для чего их используют?
24. Что такое магнитно-жесткие ферромагнетики? Для чего их используют?
25. От чего зависит площадь, охваченная петлей гистерезиса ферромагнетика?

ВТОРОЙ УРОВЕНЬ

1. Изобразите электрическую схему установки. Объясните принцип ее действия.
2. Как измеряют напряженность магнитного поля в ферромагнитном сердечнике?
3. Как измеряют индукцию магнитного поля в ферромагнитном сердечнике?
4. Как определяется мощность, расходуемая на перемагничивание ферромагнетика?

ТРЕТИЙ УРОВЕНЬ

1. Получите выражение для частоты прецессии электронных орбит в магнитном поле.
2. Объясните природу пара- и диамагнетизма.
3. Объясните природу ферромагнетизма.
4. На сколько этапов принято делить начальное намагничивание ферромагнетика? Опишите особенности каждого этапа.
5. Объясните явление гистерезиса в ферромагнетиках.
6. Объясните зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля.

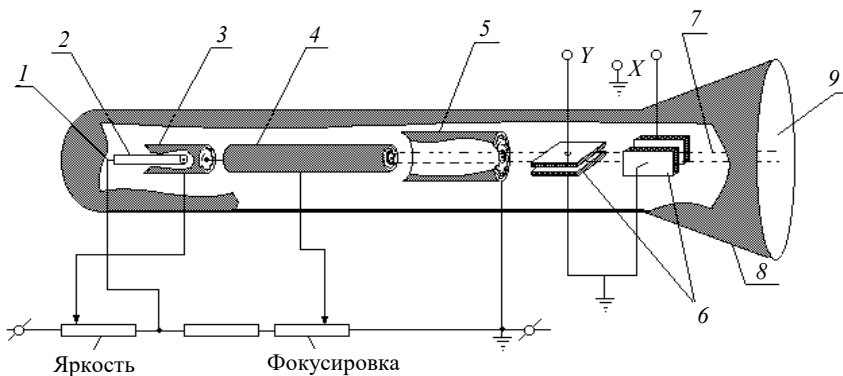
Приложение 2

В лабораториях кафедры общей физики на рабочем столе студента может быть установлен либо электронный, либо цифровой осциллограф. Ниже приводится описание этих приборов.

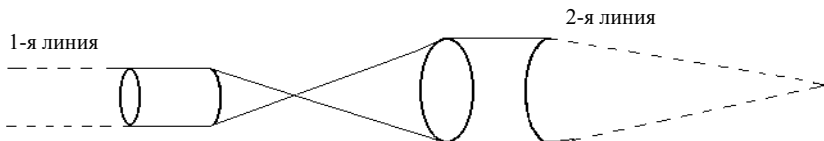
ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Краткое описание

Осциллограф (рис. П1) предназначен для наблюдения и сравнения периодических напряжений. Его показания практически не зависят от мощности сигнала.



a



б

Рис. П1. Электронно-лучевая трубка:

a – конструкция; *б* – оптическая аналогия трубки

На рис. П1, *а* показана конструкция главного элемента осциллографа – электронно-лучевой трубки. Цифрами на рисунке отмечены следующие элементы:

- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| 1 – подогреватель; | 6 – отклоняющие пластины; |
| 2 – катод; | 7 – электронный пучок; |
| 3 – управляющий электрод; | 8 – колба трубки; |
| 4 – первый анод; | 9 – люминесцирующий экран. |
| 5 – второй анод; | |

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) представляет собой стеклянный баллон, из которого выкачан воздух до давления порядка 10^{-6} мм рт. ст.

Образование и фокусировка электронного пучка осуществляются с помощью «электронной пушки», состоящей из подогреваемого катода 2, управляющего электрода 3 и двух анодов 4, 5.

Электростатическое поле между катодом и управляющим электродом регулирует число электронов в электронном пучке, а следовательно, и яркость пятна на экране.

Электростатическое поле между катодом и анодом фокусирует и ускоряет электроны.

Процесс фокусировки электронного пучка с помощью электростатических полей во многом напоминает действие оптических линз на лучи света (рис. П1, *б*).

Отклоняющие пластины 6 представляют собой плоские конденсаторы. Причем одна пара пластин располагается горизонтально и, следовательно, отклоняет электронный пучок вверх-вниз, а вторая пара – вертикально, эта пара отклоняет пучок вправо-влево. Электронный пучок, попадая между ними, испытывает отклонение, зависящее от величины приложенного к пластинам напряжения, причем если напряжение на пластинах отсутствует, то пучок попадает в центр экрана.

Для исследования напряжений, изменяющихся во времени, используют обе пары отклоняющих пластин. На горизонтально отклоняющие пластины (вход *Y* осциллографа) обычно подается исследуемое напряжение, а на вертикально отклоняющие пластины (вход *X* осциллографа) подается вырабатываемое в самом осциллографе напряжение, изменяющееся пропорционально времени, – так называемое напряжение развертки. Это напряжение вырабатывает генератор развертки.

Генератор развертки

Если на вертикально отклоняющие пластины подано переменное напряжение $U(t)$, то световое пятно на экране будет совершать вертикальные колебания. Поскольку обычно эти колебания происходят с большой частотой и люминофор, нанесенный на экран, имеет послесвечение (инерционность), то на экране будет видна неподвижная вертикальная линия. Пусть одновременно напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах возрастает по линейному закону $U = U_0 + kt$. Под действием этого напряжения пятно на экране осциллографа будет равномерно перемещаться слева направо. Результирующая траектория луча представит зависимость исследуемого напряжения $U(t)$ от времени.

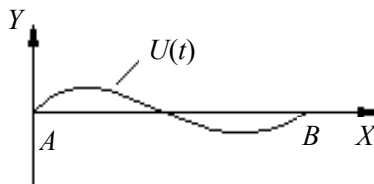


Рис. П2. Изменение напряжения от времени

Если по истечении времени, равного или кратного периоду исследуемого колебания, напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах мгновенно падает до первоначального значения U_0 , то световое пятно мгновенно возвращается в исходное положение. Напряжение $U(x)$ при этом является пилообразным. Повторив развертку с постоянной скоростью, мы увидим на экране второй период изменения величины $U(t)$. Смещая луч от точки A до B вдоль горизонтальной оси с постоянной скоростью, а потом мгновенно возвращая его от B до A и повторяя такую развертку многократно, на экране мы видим неподвижную картину зависимости $U(t)$ (рис. П2).

Некоторые осциллографы (например, С1-83) позволяют наблюдать на экране одновременно два сигнала (двухканальная схема подключения). Для этого сигналы первого и второго канала с помощью специального переключателя поочередно подаются на вертикально отклоняющие пластины.

Описание органов управления электронным осциллографом С1-83

Передняя панель осциллографа приведена на рис. ПЗ.

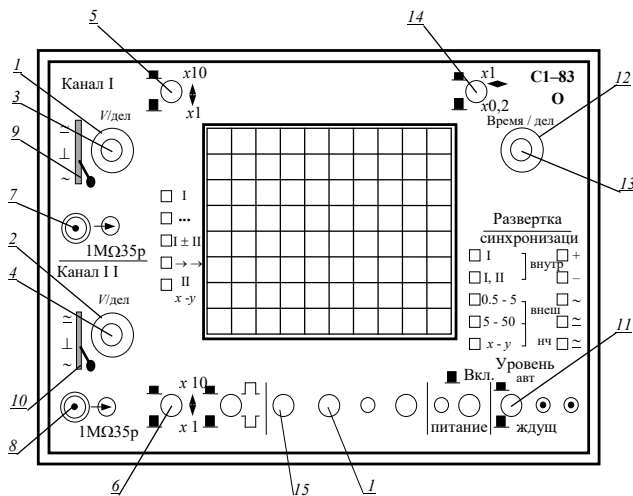


Рис. ПЗ. Передняя панель осциллографа

1. Органы управления трактом вертикального отклонения:

- переключатели *V/дел* 1, 2, устанавливающие калиброванные коэффициенты отклонения каналов I и II;
- потенциометры 3, 4, обеспечивающие плавную регулировку коэффициентов отклонения обоих каналов с перекрытием не менее чем в 2,5 раза в каждом положении переключателей *V/дел*. Для достижения соответствия пределов масштабной сетки, установленных переключателями 1, 2, необходимо повернуть потенциометры по часовой стрелке до предела;
- потенциометры 5, 6, регулирующие положение лучей обоих каналов по вертикали;
- 7, 8 – гнезда для подачи исследуемых сигналов (канал I, канал II);
- 9, 10 – переключатели режима работы входов усилителя в положениях:
 - «~» – на вход усилителя исследуемый сигнал поступает через разделительный конденсатор (закрытый вход);

« \sim » – на вход усилителя исследуемый сигнал поступает с постоянной составляющей (открытый вход);

« \perp » – вход усилителя подключен к корпусу;

- переключатели режима работы усилителей могут находиться в положениях:

«I» – на экране ЭЛТ наблюдается сигнал канала I;

«I I», «X-Y» – на экране ЭЛТ наблюдается сигнал канала II;


«I \pm II» – на экране ЭЛТ наблюдается алгебраическая сумма сигналов каналов I и II;

«...» – на экране ЭЛТ наблюдаются изображения сигналов обоих каналов, их переключение осуществляется с частотой 100 кГц;

« $\rightarrow\rightarrow$ » – на экране ЭЛТ наблюдаются изображения сигналов обоих каналов, их переключение осуществляется в конце каждого прямого хода развертки;

- переключатели инвертирования сигнала в канале II могут находиться в положениях:

«» – фаза сигнала не меняется;

«» – фаза сигнала меняется на 180°;

- переключатели изменения усиления каналов в 10 раз, совмещенные с ручками 5, 6, могут находиться в положениях:

«x1» – коэффициент отклонения канала соответствует коэффициенту, выставленному переключателем 1 или 2;

«x10» – коэффициент отклонения канала соответствует коэффициенту, выставленному переключателем 1 или 2, умноженному на 10.

2. Органы управления синхронизацией:

- потенциометр II («Уровень»), выбирающий уровень исследуемого сигнала, при котором происходит запуск развертки;

- переключатель источника синхронизации может находиться в положениях:

«Внутр. I» – развертка синхронизируется сигналом первого канала;

«Внутр. I, II» – развертка синхронизируется сигналами обоих каналов (или одного);

«0,5-5 Внеш.» – развертка синхронизируется внешним сигналом амплитудой 0,5...5 В;

«5-50 Внеш.» – развертка синхронизируется внешним сигналом амплитудой 5...50 В;

«X-Y» – вход усилителя X отключается от генератора развертки и подключается к каналу I усилителя Y, работа генератора развертки прекращается.

3. Органы управления разверткой:

- переключатель 12 («ВРЕМЯ/ДЕЛ»), устанавливающий калиброванный коэффициент развертки, когда ручка плавной регулировки 13 установлена в крайнее правое положение;
- потенциометр 14, обеспечивающий перемещение луча по горизонтали;
- переключатель «x1, x0,2 », связанный с ручкой 14 и увеличивающий скорость развертки в положении « x0,2 » в 5 раз;
- «АВТ» – режим, вырабатывающий пилообразное напряжение независимо от запускающего сигнала;
- «ЖДУЩ» – запуск развертки (осуществляется только при наличии синхронизирующего сигнала).

Инструкция по эксплуатации осциллографа

1. Включите осциллограф в сеть напряжением ~ 220 В.
2. После появления светового пятна на экране сфокусируйте его и установите нормальную яркость свечения.
3. Установите пятно в центр экрана.
4. Включите генератор развертки. При этом на экране будет видна горизонтальная полоса.
5. Исследуемый сигнал подайте на вход «Y». При правильно подобранном коэффициенте отклонения и частоте синхронизации на экране будет видна неподвижная осциллограмма.
6. При двухканальной схеме подключения один из исследуемых сигналов подайте на вход первого, а другой – второго канала. Нажатием нужных кнопок и правильным подбором коэффициентов отклонения по каждому из каналов (см. описание органов управления трактом вертикального отклонения) добейтесь устойчивого изображения одновременно двух сигналов.

При двухканальной схеме подключения осциллограф позволяет путем включения нужных кнопок складывать исследуемые сигналы. Причем сигналы могут суммироваться либо как одинаково направленные,

либо как взаимно перпендикулярные (см. описание органов управления трактом вертикального отклонения и органов управления синхронизацией).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Осциллограф универсальный С1-83. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Альбом № 1. – М., 1986.

ЦИФРОВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Описание органов управления цифровым осциллографом ОЦЛ2-02

В цифровом осциллографе электронно-лучевая трубка не используется. Сигналы, поданные на входы прибора, наблюдают на жидкокристаллическом дисплее.

Передняя панель осциллографа показана на рис. П4.

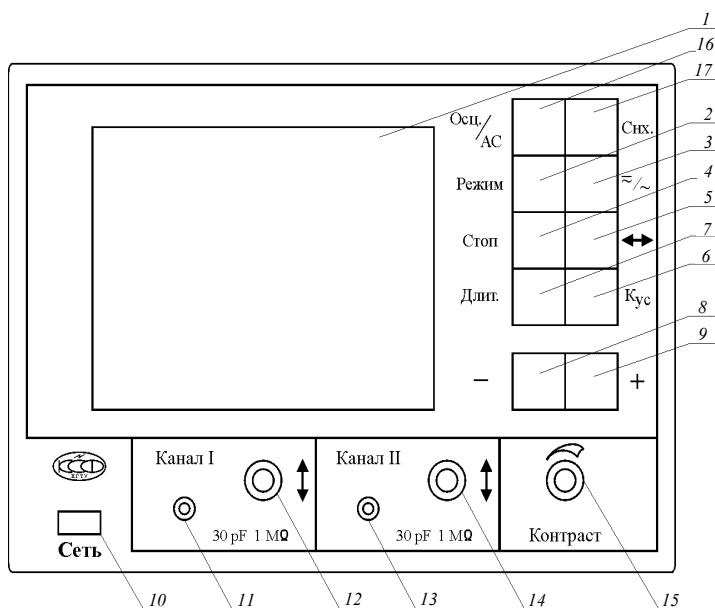


Рис. П4. Передняя панель лабораторного осциллографа

На передней панели прибора расположены:

- 1 – графический дисплей;
- 2 – кнопка выбора режима работы;
- 3 – кнопка переключателя закрытого или открытого канала;
- 4 – кнопка запоминания оцифрованного сигнала;
- 5 – кнопка смещения оцифрованного сигнала;
- 6 – кнопка выбора коэффициентов отклонения;
- 7 – кнопка выбора временной развертки;
- 8 – кнопка уменьшения выбранной величины;
- 9 – кнопка увеличения выбранной величины;
- 10 – кнопка выключателя «Сеть»;
- 11 – вход первого канала;
- 12 – ручка смещения первого канала по вертикали;
- 13 – вход второго канала;
- 14 – ручка смещения второго канала по вертикали;
- 15 – ручка регулировки контраста изображения;
- 16 – кнопка выбора типа прибора (осциллограф или анализатор сигнала), в данной версии не используется;
- 17 – кнопка выбора типа синхронизации.

Экран дисплея разделен на два поля (рис. П5):

- поле отображения сигнала;
- информационное поле.

Поле отображения сигнала содержит координатную сетку, на которую накладывается измеряемый сигнал.

Информационное поле разделено на три области.

- Область общих установок. Отображает режим работы осциллографа (строка «Режим»), временную развертку (строка «Длительность»), смещение привязки сигнала по оси времени (строка « \leftrightarrow ») и состояние стоп-кадр (строка «стоп»).
- Область состояния канала I. Отображает коэффициенты усиления сигнала, поданного на канал I (строка « K_{yc} »), указатель переключателя закрытого или открытого канала (строка « \approx »), индикатор перегрузки (строка «ПЕРЕГ»).
- Область состояния канала II. Отображает информацию, аналогичную информации канала I, для сигнала, поданного на канал II.

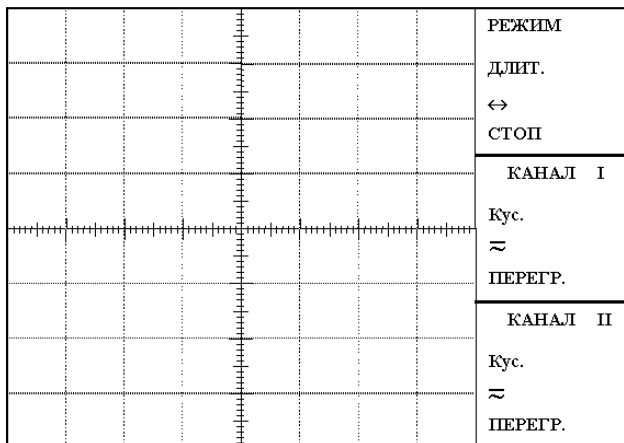


Рис. П5. Экран дисплея

Порядок работы

1. Для включения прибора соедините кабель питания с питающей сетью и нажмите кнопку 10 «Сеть», при этом загорится индикатор 1.

2. Регулировка контраста изображения проводится вращением ручки 15 «Контраст».

3. Для переключения режима работы нажмите кнопку 2 «Режим». При этом должна высветиться надпись «Режим». Затем кнопками «+» или «-» выберите необходимый режим:

I (наблюдение сигнала канала I);

II (наблюдение сигнала канала II);

I, II (одновременное наблюдение сигналов каналов I и II);

I+II (сигнал, равный алгебраической сумме сигналов каналов I и II, прошедших через калибровочные усилители) X-Y (режим X-Y).

4. Подайте исследуемый сигнал на гнезда 11 (канал I) или 13 (канал II). Для подключения исследуемого сигнала в комплект прибора входят соединительные кабели. При подключении кабеля входное сопротивление прибора равно 1 МОм с параллельной емкостью, значение которой зависит от типа используемого кабеля.

5. Для установления вида связи входного усилителя прибора с источником исследуемого сигнала (подключение входного конденсатора)

необходимо нажать кнопку 3. При этом подсветится соответствующая строка в информационном окне рабочего канала. Кнопкой «+» или «-» установите нужное. Если режим работы предполагает совместное использование двух каналов, то для перехода в информационное окно другого канала нажмите повторно кнопку 3. Установка производится аналогично.

В положении « \approx » связь с источником сигнала осуществляется по постоянному току. Если постоянная составляющая исследуемого сигнала намного больше переменной, то целесообразно выбирать связь источника исследуемого сигнала по переменному току \sim . В этом случае конденсатор входной цепи не пропускает постоянную составляющую. При исследовании низкочастотных сигналов следует помнить, что в режиме \sim нижний предел полосы пропускания составляет несколько герц.

6. Смещение графиков сигналов относительно координатной сетки по вертикали осуществляется регуляторами 12 и 14.

7. Для смещения графиков сигналов относительно координатной сетки по горизонтали необходимо нажать кнопку 5 « \leftrightarrow ». Кнопкой «+» или «-» установите нужное положение. При этом высвечивается направление смещения \rightarrow или \leftarrow соответственно. Перемещение наблюдаемого сигнала осуществляется не более чем на 1/2 дисплея. При ограничении перемещения высвечивается соответствующий символ.

8. Для изменения коэффициента отклонения нажмите кнопку 6 (« K_{yc} »). При этом высветится надпись «Усил» того канала, который соответствует выбранному режиму работы. Если режим работы предполагает совместное использование двух каналов, то переход между выбором коэффициентов отклонения каналов осуществляется повторным нажатием кнопки 6 (« K_{yc} »).

Установить необходимое значение коэффициента отклонения для выбранного канала можно при помощи кнопок «+» или «-».

9. Для изменения времени развертки необходимо нажать кнопку 7 («Длит»). Изменения необходимо проводить при помощи кнопок «+» или «-».

10. Для включения режима «Стоп-кадр» необходимо нажать кнопку 4 («Стоп»). При этом кадр будет остановлен для проведения измерений. Для выхода из этого режима необходимо нажать кнопку «Стоп» повторно.

В режиме «Стоп-кадр» активна только кнопка « \leftrightarrow ».

11. При работе в режиме $X-Y$ рекомендуется предварительно получить два-три периода отображаемых сигналов в режиме I, II, а затем перейти в режим $X-Y$. Это связано с тем, что количество отображаемых отсчетов ограничено.

12. В данной модели предусмотрена автоматическая синхронизация по заданному фронту сигнала. Переключение вида синхронизации осуществляется нажатием кнопки 17 («Снх»), при этом на дисплее подсвечивается слово «Синхр.». Далее при помощи кнопок «+» и «-» переключается фронт синхронизации («+» соответствует переднему фронту сигнала, «-» – заднему).

13. Если при включении прибора или во время его работы происходят какие-нибудь сбои, рекомендуется произвести сброс путем выключения и повторного включения прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Осциллограф цифровой лабораторный ОЦЛ-2-01. Техническое описание. – Новосибирск, 2005.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 10. Исследование электростатического поля.....	3
Лабораторная работа № 12. Методы электрических измерений	11
Лабораторная работа № 13. Изучение работы источника ЭДС.....	18
Лабораторная работа № 15. Определение индуктивности соленоида	25
Лабораторная работа № 16. Взаимная индукция, трансформатор	37
Лабораторная работа № 19. Изучение петли гистерезиса и измерение параметров ферромагнетиков	44
Приложения.....	58
Приложение 1. Вопросы для защиты лабораторных работ.....	58
Приложение 2. Электронный осциллограф. Цифровой осциллограф.....	81

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Методические указания

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 05.09.2023. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 200 экз.
Уч.-изд. л. 5,11. Печ. л. 5,5. Изд. № 89. Заказ № 246. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20