

№ 4231

53

Э 454

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Методические указания

**НОВОСИБИРСК
2012**

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

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

УДК 537(076.5)
Э 454

Составители:

П.А. Крапивко (приложение),
А.В. Морозов (лаб. работы № 12, 13, 15, приложение),
Б.Л. Паклин (лаб. работа № 10),
А.М. Погорельский (лаб. работы № 15, 16),
Н.П. Потапов (лаб. работа № 19),
О.Ю. Рубцова (лаб. работа № 12),
Н.Я. Усольцева (лаб. работа № 13),
В.В. Христофоров (лаб. работы № 13, 15, 16),
А.А. Шевченко (лаб. работы № 12, 13, 15, приложение)

Разработка и изготовление лабораторных установок:
А.М. Погорельский, А.В. Морозов, А.А. Шевченко, П.А. Крапивко

Подготовка к изданию *В.В. Христофоров*

Рецензент доцент *А.В. Баранов*

Работа подготовлена на кафедре общей физики

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 10. Исследование электростатического поля	4
Лабораторная работа № 12. Методы электрических измерений	12
Лабораторная работа № 13. Изучение работы источника ЭДС	18
Лабораторная работа № 15. Определение индуктивности соленоида.....	24
Лабораторная работа № 16. Взаимная индукция, трансформатор	35
Лабораторная работа № 19. Изучение петли гистерезиса и измерение параметров ферромагнетиков	42
Приложение	57

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: исследование электростатического поля с помощью экспериментального моделирования в проводящей среде, по которой протекает переменный ток. Построение эквипотенциальных и силовых линий этого поля.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Если в пространстве имеется система заряженных тел, то в каждой точке этого пространства существует силовое электростатическое поле, которое определяется через силу, действующую на «пробный» заряд в данной точке пространства. «Пробный» заряд q_0 должен быть точечным и достаточно малым по величине, чтобы не вносить существенных искажений в силовое поле, созданное системой зарядов. Чтобы напряженность электростатического поля $\vec{E}$ не зависела от величины «пробного» заряда, ее определяют 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 напряженности электростатического поля. Например, вблизи точечных зарядов эти линии сгущаются, так как напряженность $\vec{E}$ возрастает. Направление напряженности электростатического поля, как видно из (10.1), совпадает с направлением силы,

действующей на положительный заряд в данной точке пространства со стороны этого поля. Силовые линии $\vec{E}$ начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах или уходят на бесконечность. Силовые линии электростатического поля не замкнуты. Сила, действующая на точечный заряд величиной q , полностью определяется величиной самого заряда и напряженностью электростатического поля в данной точке пространства:

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

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

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

Так как силы взаимодействия двух точечных зарядов направлены вдоль линии, их соединяющей, и зависят лишь от расстояния между ними, то сила, действующая на заряд, помещенный в электростатическое поле, является центральной и, следовательно, консервативной. Вследствие этого работа по перемещению заряда в электростатическом поле не зависит от траектории движения, а определяется лишь начальным и конечным положениями заряда на этой траектории. Поэтому стационарное электрическое (т. е. электростатическое) поле является потенциальным.

В каждой точке такого поля можно кроме силовой характеристики ввести энергетическую характеристику – потенциал ϕ . При перемещении «пробного» заряда q_0 по произвольному пути из точки 1 с потенциалом ϕ_1 в точку 2 с потенциалом ϕ_2 силами электростатического поля совершается работа

$$A_{12} = q_0 (\phi_1 - \phi_2). \quad (10.3)$$

Следовательно, разность потенциалов между точками 1 и 2 ($\phi_1 - \phi_2$) можно определить как отношение работы сил поля A_{12} к величине заряда q_0 :

$$(\phi_1 - \phi_2) = \frac{A_{12}}{q_0}.$$

При бесконечно малом перемещении $d\vec{l}$ заряда 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: $\delta A = -q_0 \cdot d\varphi$. Тогда, сокращая на q_0 и приравнивая 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 найдем 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.

Согласно (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 характеристики электростатического поля связаны друг с другом.

Поверхности равного потенциала $\varphi = \text{const}$ называются эквипотенциальными. 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 слабо проводящую среду, которую представляет собой недистиллированная вода, 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 зачастую невозможен из-за сложности граничных условий. Использование переменного тока позволяет предотвратить выделение на электродах составных частей электролита. Для переменного синусоидального тока в электролите переменное элек-

трическое 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 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 точке 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 модулю вектора напряженности электрического поля в этом месте 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 или тел другой геометрической формы, 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).

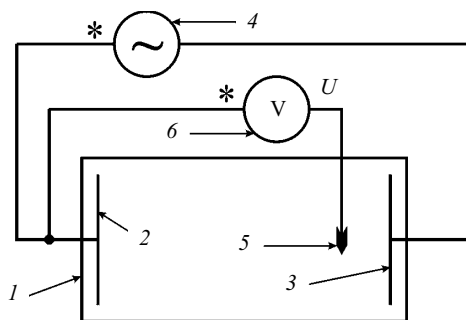


Схема измерительной установки

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 (~10) 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 данной эквипотенциальной поверхности, как отмечалось, измеряется относительно электрода 2. Построив несколько 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. Согласуйте с преподавателем конфигурацию расположения электродов.
2. Соберите схему в соответствии с рисунком.
3. Налейте в ванну недистиллированную воду (слабый электролит). Убедитесь в том, что координатная сетка плотно прилегает ко дну ванны.

4. Начертите в определенном масштабе координатную сетку и отметьте на ней положение и форму электродов и дополнительных тел, если они помещены между электродами.

5. Подключите электроды к генератору звуковых частот либо к генератору переменного напряжения. Установите напряжение U , близкое к максимальному, и частоту $F \sim 1200$ Гц.

6. 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.

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

8. Проведите измерения, аналогичные пп. 6 и 7, для семи-десяти линий с другими 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.

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

Примечание. Линии должны начинаться на одном, а заканчиваться на другом электроде.

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

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

12. Начертите картину поля и оцените его напряженность, повторив пп. 6–10. Вблизи тела старайтесь проводить измерения особенно тщательно.

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается цель настоящей работы?
2. Как найти точки с одинаковым значением потенциала?
3. Как определить значение потенциала на эквипотенциальной поверхности? Относительно какого тела он определяется?
4. Что такое напряженность и потенциал электростатического поля?
5. Какова связь проекции вектора напряженности на некоторое направление и потенциала?
6. Какова связь вектора напряженности и потенциала?
7. Как по картине эквипотенциальных линий построить картину силовых линий электростатического поля? Докажите, что силовые линии пересекают эквипотенциальные поверхности под прямым углом.
8. Каково взаимное влияние проводящего тела и электростатического поля?
9. Какой угол составляют силовые линии с поверхностью заряженного проводника в непосредственной близости от нее вне проводника?
10. Чему равны напряженность и потенциал внутри заряженного проводника при равновесном распределении его заряда?
11. Где расположен избыточный заряд проводника?
12. Как можно вычислить напряженность и потенциал поля точечного заряда?
13. Как можно вычислить напряженность и потенциал поля, если заряженное тело нельзя считать точечным зарядом?
14. Сформулируйте теорему Гаусса для вектора напряженности электростатического поля в вакууме. Объясните, для чего и как она применяется.

ЛИТЕРАТУРА

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, 1995.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

МЕТОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: овладеть методами измерения электрических величин 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.

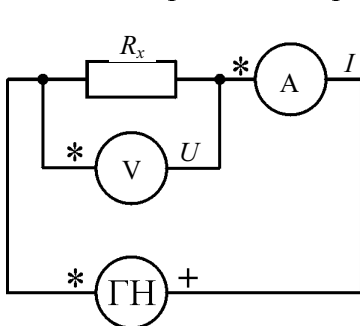


Рис. 12.1

Используя рабочую формулу $R = \frac{U}{I}$,

можно определить величину сопротивления R для нескольких значений напряжения U на концах проводника.

Измерения U и I проводятся с помощью вольтметра и амперметра по схеме рис. 12.1.

Для достоверного определения R_x необходимо, чтобы сопротивление вольтметра $R_V \gg R_x$.

Измерения R_x проводятся при различных значениях напряжения U генератора напряжения, что позволяет найти R_x для нескольких измерений и рассчитать величину погрешности.

ИЗМЕРЕНИЕ НЕИЗВЕСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрим схему моста постоянного тока, представленную на рис. 12.2. Здесь R_x — неизвестное сопротивление; R_1 — переменное со-

противление; 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 между точками c и d $\varphi_c - \varphi_d$ равна нулю, мост находится в равновесии. Следовательно, если мост находится в равновесии, измерительный прибор, подключенный к точкам c и d , будет показывать «ноль». Установление состояния равновесия моста обеспечивается изменением переменного сопротивления R_1 .

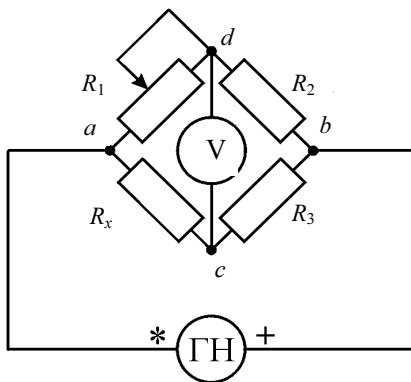


Рис. 12.2

Для того чтобы мост находился в равновесии, необходимо выполнить следующие соотношения:

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

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

При равновесии моста ток течет только на участке моста acb (обозначим его I_x) и на участке adb (обозначим его I_1).

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 измерять параметры 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.

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 которые укладывается изучаемая часть сигнала.

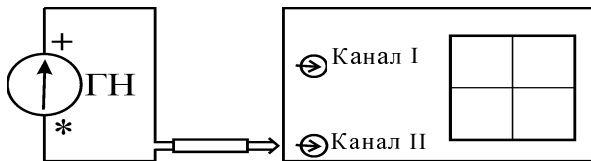


Рис. 12.3

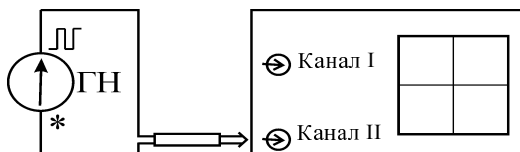


Рис. 12.4

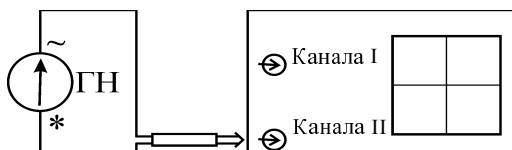


Рис. 12.5

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

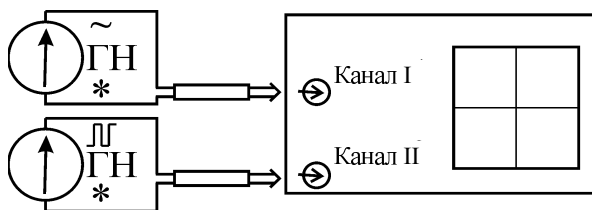


Рис. 12.6

Некоторые модели осциллографов позволяют не только наблюдать одновременно два сигнала на экране, но и осуществлять сложение этих сигналов. При этом возможны два режима сложения. При первом режиме 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. При 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 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. Измерьте неизвестные сопротивления R_{1x} и R_{2x} с помощью вольтметра и амперметра, изменяя величину напряжения генератора постоянного напряжения 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 измерений при доверительной вероятности 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 пп. 2 и 3. Сделайте выводы.

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

7. Измерьте напряжение сигнала. Назовите форму сигнала.

8. Подключите генератор прямоугольных импульсов к осциллографу (см. 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 (см. рис. 12.5). Зарисуйте полученный сигнал.

11. Измерьте амплитудное напряжение сигнала. Рассчитайте значение действующего напряжения U_d . 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.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие способы измерения сопротивления вам известны?
2. Сформулируйте закон Ома для участка цепи в интегральной и дифференциальной (локальной) формах. Объясните смысл всех величин, входящих в законы.
3. Сформулируйте закон Ома для неоднородного участка цепи, т. е. для участка цепи, в котором имеется источник ЭДС.
4. В чем состоит метод измерения сопротивления с помощью моста постоянного тока?
5. Как измерить период и определить частоту сигнала с помощью осциллографа?
6. Как измерить амплитуду сигнала с помощью осциллографа?
7. Как происходит управление электронным пучком в электронном осциллографе?
8. Какова связь между смещением сигнала по оси x на экране осциллографа и длительностью временного интервала?
9. Как подключить осциллограф по двухканальной схеме?

ЛИТЕРАТУРА

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. № 2848. – Новосибирск, 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.

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

$$U = \varepsilon - Ir. \quad (13.1')$$

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 $I = I_{КЗ}$ (подробнее об этом токе смотри ниже). Важно отметить, что последнее утверждение – это идеализация. В реальных источниках ЭДС при токах, близких к $I_{КЗ}$, 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.

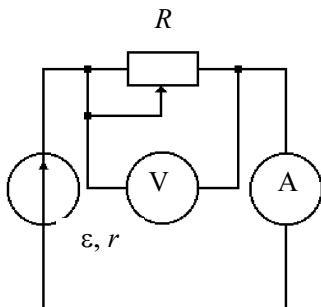


Рис. 13.1

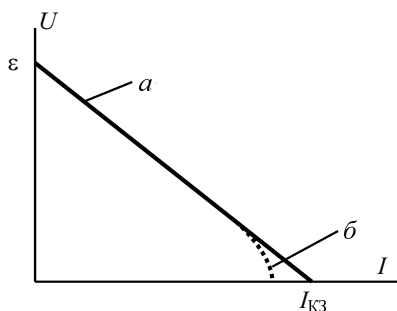


Рис. 13.2

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

$$I\varepsilon = I^2 R + I^2 r. \quad (13.2)$$

Уравнение (13.2) представим в виде

$$P = P_1 + P_2, \quad (13.3)$$

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.

Полезная мощность из (13.2) может быть представлена в виде

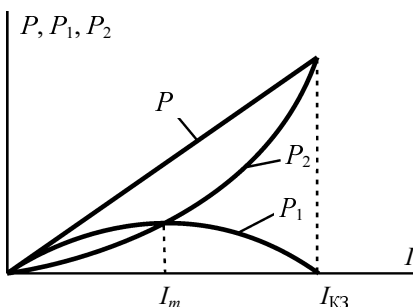


Рис. 13.3

$$P_1 = \varepsilon I - I^2 r. \quad (13.4)$$

Эта зависимость выражается параболой. Найдем значение тока, при котором полезная мощность максимальна. Для этого, взяв первую производную $\frac{dP_1}{dI}$, приравняем ее к нулю:

$$\frac{dP_1}{dI} = \varepsilon - 2Ir, \quad (13.5)$$

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

$$I_m = \frac{\varepsilon}{2r}. \quad (13.6)$$

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 (13.6) в (13.4) оказывается равной

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

Сравнивая это выражение с ранее полученным $P_1 = I^2 R$, 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

$$P_2 = I^2 r. \quad (13.7)$$

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

$$\eta = \frac{P_1}{P} = \frac{IU}{I\varepsilon} = \frac{U}{\varepsilon}. \quad (13.8)$$

Выражение для U подставим из (13.1') в (13.8):

$$\eta = \frac{\varepsilon - Ir}{\varepsilon} = 1 - I \frac{r}{\varepsilon}. \quad (13.9)$$

Из уравнения (13.9) 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

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{\varepsilon}{r}. \quad (13.10)$$

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 (13.10). Полезная мощность P_1 при этом убывает до нуля (см. рис. 13.3), так как при сопротивлении $R = 0$

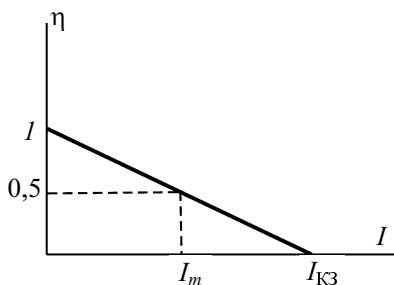


Рис. 13.4

$$P_1 = I_{\text{КЗ}} U = I_{\text{КЗ}}^2 R = 0.$$

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

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

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

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{r}{2r} = 0,5 = 50 \%. \quad (13.11)$$

Отсюда при токе $I = I_m$ полезная максимальная мощность равна $P_{1\max} = 0,5P$. Используя (13.3), 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 и 13.4) видим, что условия получения наибольшей полезной мощности $P_{1\max}$ и наибольшего КПД $\eta_{\max}$ 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 $U = \varepsilon - Ir$ (13.1'), 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 $I_{KЗ}$ и ЭДС $\varepsilon = U_{xx}$, так называемый метод короткого замыкания и холостого хода, позволяет без измерения определить $I_{KЗ}$ 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 $U_{xx} = \varepsilon$, а до пересечения с осью тока I – ток $I_{KЗ}$. Внутреннее сопротивление источника ЭДС определяют по формуле

$$r = \frac{\varepsilon}{I_{KЗ}}. \quad (13.12)$$

ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Предварительно подготовьте протокол, в котором начертите таблицу для прямых и косвенных измерений.
2. Постройте на миллиметровой бумаге необходимые оси координат.
3. Соберите электрическую схему установки. В качестве источника с электродвижущей силой ε и внутренним сопротивлением r исполь-

зуйте генератор постоянного напряжения ГПН с включенным тумблером «Внутреннее сопротивление» $R_{\text{вн}}$ 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 и тока короткого замыкания $I_{\text{кз}}$.

5. Определите по формуле (13.12) внутреннее сопротивление r источника тока.

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

7. Постройте зависимости этих величин от силы тока, экстраполируя кривые и прямые до пересечения с осями координат.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите закон Ома для замкнутой цепи. В чем состоит физический смысл ЭДС?

2. Каким нужно сделать сопротивление вольтметра, чтобы измеренное им значение ЭДС было как можно ближе к истинному?

3. Дайте определение полной, полезной мощности и мощности потерь.

4. При каком условии полезная мощность будет максимальной? Докажите.

5. Проанализируйте зависимости мощностей P , P_1 , P_2 от силы тока.

6. Что называется коэффициентом полезного действия источника (батареи)? Проанализируйте зависимость $\eta = f(I)$.

7. Сравните полученные опытным путем зависимости с теоретическими.

8. Охарактеризуйте физический смысл напряжения, разности потенциалов.

9. Как определить силу тока короткого замыкания и ЭДС источника тока, сняв зависимость напряжения от силы тока?

ЛИТЕРАТУРА

1. *Калашников 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

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

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 (число витков на одном метре длины соленоида); V – объем соленоида; μ – магнитная проницаемость вещества 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 $L = \text{const}$ 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*

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

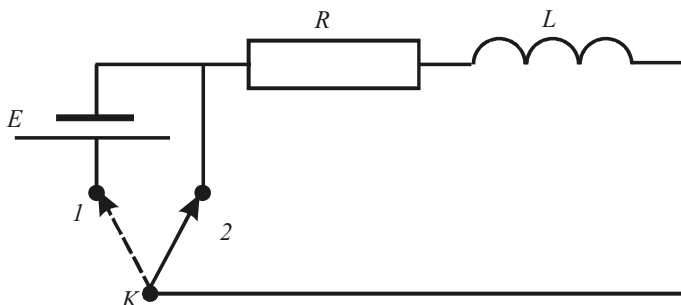


Рис. 15.1

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.

Из закона Ома для замкнутой цепи, в которой действует источник ЭДС E , а общее активное сопротивление 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 времени $t = t_1$ 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 получить 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 $I(t \rightarrow \infty) = \frac{E}{R}$, соответствующей величине постоянного тока (рис. 15.2). Нарастание тока происходит тем медленнее, чем меньше отношение $\frac{R}{L}$ в показателе степени экспоненты или больше обратное отношение $\tau = \frac{L}{R}$, физический смысл которого обсуждается ниже.

Если же в момент времени 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 $\tau = \frac{L}{R}$ (**время релаксации**) сила тока изменяется в $e \approx 2,71$ раза.

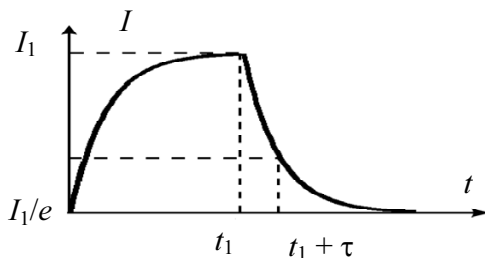


Рис. 15.2

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 силу токов (или напряжения) в некоторые моменты времени 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 :

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

Будем называть это первым способом определения индуктивности.

3. Вынужденные электромагнитные колебания в контуре, их применение для измерения индуктивности

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 изменяю-

шейся ЭДС (рис. 15.3). В этом случае колебания в контуре являются вынужденными.

Пусть внешняя ЭДС изменяется по гармоническому закону

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

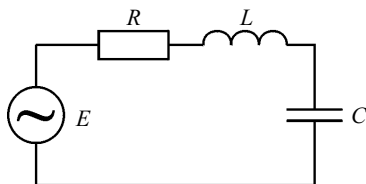


Рис. 15.3

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

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

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 $\frac{1}{\omega C}$** и **индуктивное сопротивление ωL** .

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

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

Назовем это вторым способом определения индуктивности.

ПЕРВЫЙ ВАРИАНТ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ОЦЕНКА ИНДУКТИВНОСТИ СОЛЕНОИДА

Задание к работе (первый вариант выполнения работы)

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

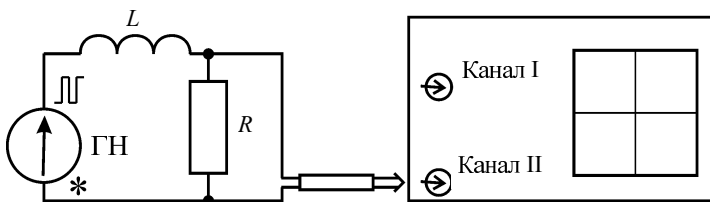


Рис. 15.4

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 изображена на рис. 15.2.

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.)

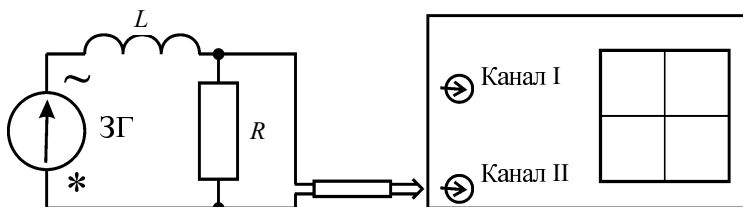


Рис. 15.5

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 лабораторной работы № 12).

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, изображенной 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

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

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

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.

Отметим, 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):

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

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 $\frac{E_0}{(U_{R_1})_0}$, а это отношение велико, ес-

ли падение 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 (второй вариант выполнения работы)

1. 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 .
11. Вычислите индуктивность по формуле (15.19) для всех трех частот.
12. Сравните результаты измерения, объясните различия.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит явление электромагнитной индукции?
2. Сформулируйте закон Фарадея и правило Ленца для электромагнитной индукции.
3. Объясните физическую причину появления индукционного тока в неподвижном контуре, помещенном в переменное магнитное поле.
4. Найдите выражение для ЭДС индукции и индукционного тока в плоском витке, равномерно вращающемся в однородном, стационарном магнитном поле.

5. В чем состоит явление самоиндукции? Напишите выражение для ЭДС самоиндукции.

6. Что называется индуктивностью контура? От чего она зависит?

7. Как определить индуктивность контура путем подключения и отключения внешнего источника ЭДС (т. е. первым способом)?

8. Объясните физический смысл времени релаксации. Как, измерив это время, определить индуктивность соленоида?

9. Как повысить точность этих измерений? Получите соответствующие рабочие формулы.

10. Как, используя вынужденные электромагнитные колебания, измерить индуктивность соленоида вторым способом? Получите соответствующую формулу.

11. Что влияет на точность измерения индуктивности вторым способом и как ее повысить?

ЛИТЕРАТУРА

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 . Поставим вопрос: чему равна индуктивность системы, состоящей из этих последовательно соединенных соленоидов, если они расположены так, что магнитные поля перекрываются?

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

$$\Psi = LI ,$$

где I – сила тока в соленоидах.

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

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

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

Смысл знаков определяется характером соединения и расположения соленоидов. Если магнитные поля соленоидов 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 вторым контуром, обусловленный магнитным полем тока I_1 , протекающего в первом контуре (рис. 16.1).

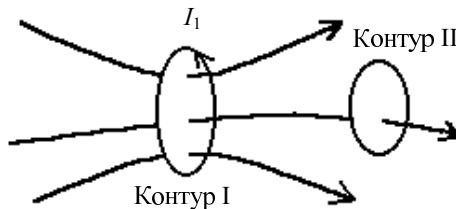


Рис. 16.1

Чем больше сила тока I_1 в первом контуре, 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) второго и первого контуров. Этот коэффициент зависит от геометрических размеров, формы, количества витков, взаимного расположения первого и второго контуров, от магнитной проницаемости среды, в которой они находятся.

Если источник тока отключить от первого контура и подключить ко второму, создав ток I_2 , то для магнитного потока через площадь первого контура 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 первый и второй контуры 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 второго и первого контуров.

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.

Переменное магнитное поле тока I_1 , протекающего в первичной обмотке трансформатора, вызывает появление ЭДС взаимной индукции во вторичной обмотке. Магнитное поле первичной обмотки прак-

тически 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.

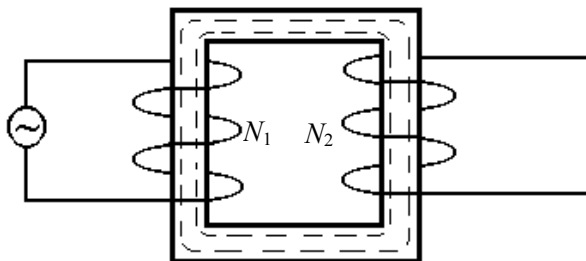


Рис. 16.2

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 обмоток 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 уравнения 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 (5), (6), (7), (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.

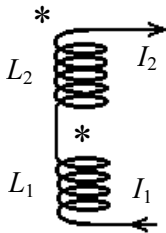


Рис. 16.3

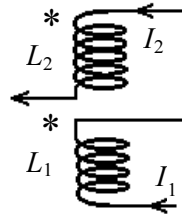


Рис. 16.4

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 количеству витков в обмотках.

4. Измерьте коэффициент трансформации для трансформатора с ферромагнитным сердечником.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определить индуктивность системы двух близко расположенных соленоидов?
2. Почему индуктивность системы зависит от относительного направления токов в соленоидах?
3. Когда приходится пользоваться понятием динамической индуктивности?

4. Почему в трансформаторах, как правило, применяют ферромагнитные сердечники?
5. Почему ферромагнитные сердечники не делают сплошными, а собирают из изолированных друг от друга пластин?
6. Почему ферритовые сердечники трансформаторов делаются сплошными?
7. Почему обмотки трансформаторов, у которых нет ферромагнитного сердечника, наматывают одну поверх другой?
8. Что такое коэффициент трансформации?
9. Что такое режим холостого хода?
10. Как коэффициент трансформации связан с количеством витков в обмотках? Получите соответствующую формулу.

ЛИТЕРАТУРА

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 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 ковалентной их связи друг с другом.

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

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 $\mu_S = 1,6 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Тл}$ ($1 \text{ Дж/Тл} = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$). 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 $\vec{P}_S = \sum \vec{\mu}_S = 0$.

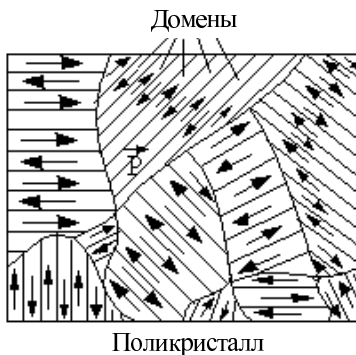


Рис. 19.1

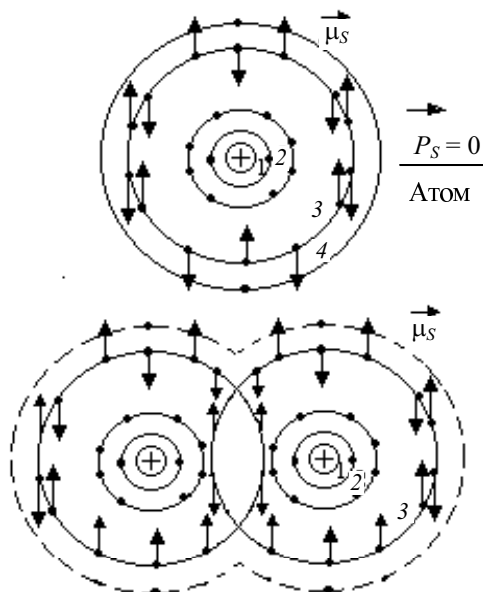


Рис. 19.2

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

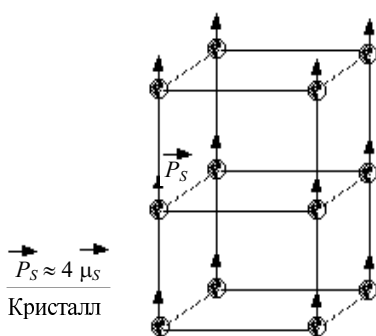


Рис. 19.3

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.

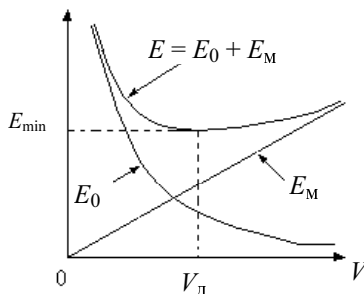


Рис. 19.4

Этому же условию способствует **деление кристалликов 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 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 монокристалликам образца (см. рис. 19.1).

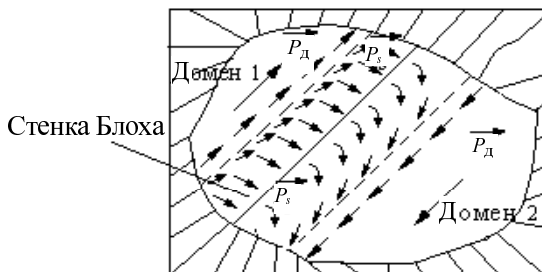


Рис. 19.5

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 (поле $H_1 < H_2 < H_3$). 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 поля: $\mu = f_2(H)$.

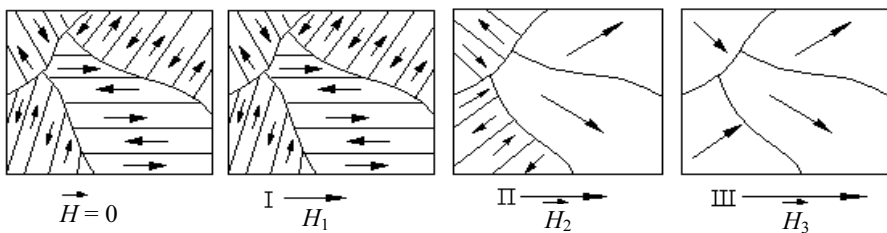


Рис. 19.6

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 происходят **обратимое** смещение границ и увеличение объема доменов, ориентация которых близка к направлению поля H . Соседние антипараллельные домены 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 также в энер-

гию возникающих звуковых волн. В конце участка II большинство доменов, поглотив соседние, оказываются сориентированными 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** намагниченности ферромагнетика (H_S , B_S). Дальнейшее увеличение индукции $\vec{B}$ не зависит от его свойств и связано только с ростом $\vec{H}$.

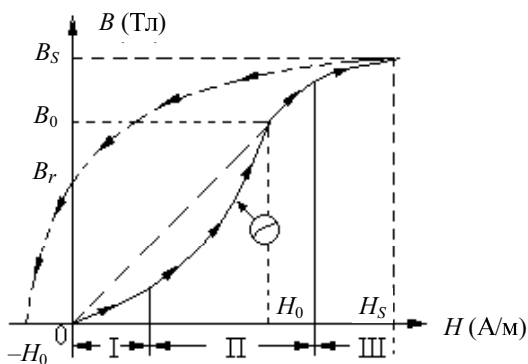


Рис. 19.7

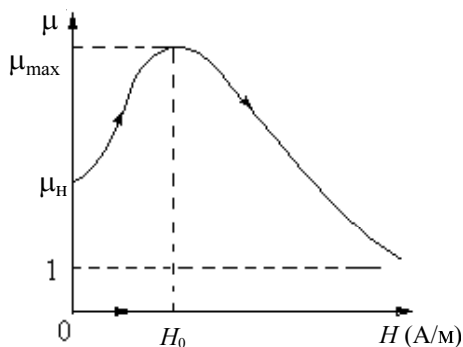


Рис. 19.8

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_H до максимального значения $\mu_{\max} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_0}{H_0}$ при $H = H_0$, как показано на 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 (см. рис. 19.7). Значение H_c напряженности поля 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 поле $H = f(t)$ процесс изменения магнитной индукции поля в образце характеризуется симметричной замкнутой кривой, которая вследствие запаздывания изменения индукции называется **петлей гистерезиса** (рис. 19.9). Если амплитуда напряженности поля заходит в область насыщения намагнитченности образца, петля гистерезиса называется **предельной**, в остальных случаях – **петлей основного цикла** (основная петля гистерезиса). Нелинейность петли показывает, что **индукция поля изменяется не по закону изменения напряженности**. 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).

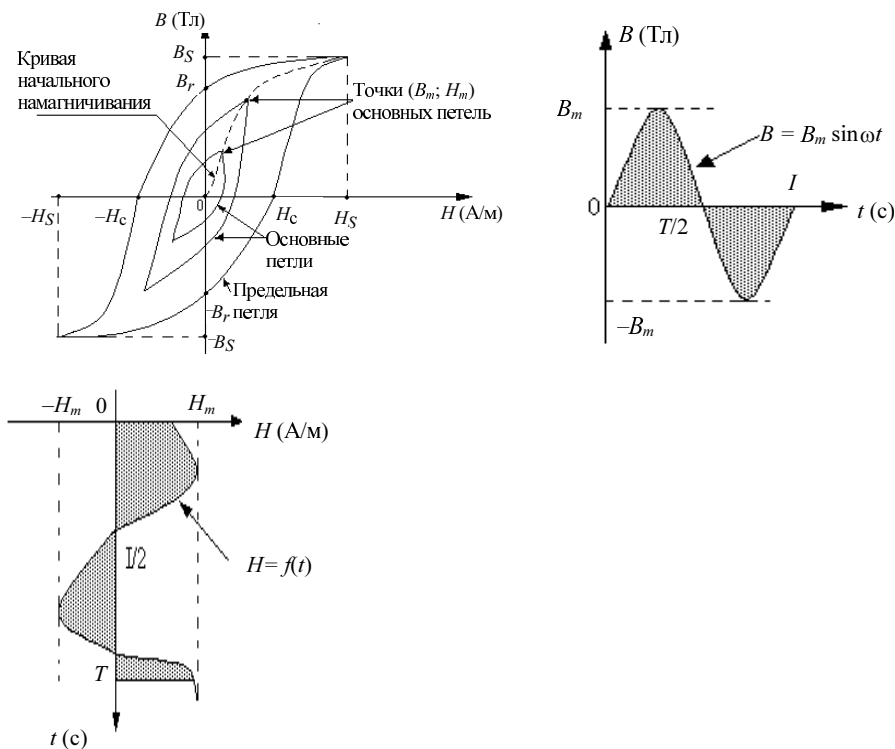


Рис. 19.9

Две ветви петли гистерезиса означают, что любому значению H соответствуют для этой петли два значения магнитной индукции B , зависящих 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.

5. Энергия гистерезисных потерь, расходуемая за один полный цикл перемагничивания какого-либо образца, равна произведению объема образца V_0 на площадь 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 насыщенного значения H_S 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; ФО – ферромагнитный образец (сердечник трансформатора); N_1 – намагничивающая обмотка; N_2 – измерительная обмотка; R и C – рези-

стор и конденсатор RC -цепочки; R_1 – резистор для получения напряжения U_x ; электронный или цифровой осциллограф (см. приложение).

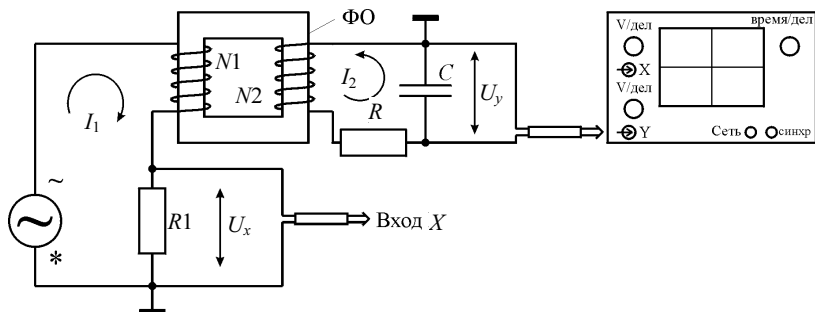


Рис. 19.10

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

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

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

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

Сопrotивление 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 обмотке N_2 индуцируется ЭДС

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

создающая ток 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

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

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 (19.7) и (19.6) 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 $\chi = K_x K_y \frac{\nu N_1 RC}{N_2 R_1}$; $S_r = \oint X dY$ – площадь петли гистерезиса на экране осциллографа (в координатах x, y), измеряемая в квадратных делениях шкалы экрана осциллографа.

ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Соберите схему установки, приведенную на рабочем месте (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 осями координат на шкале экрана и по формулам (19.5) и (19.9) вычис-

лите 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 и μ (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 по п. 7. Данные занесите в таблицу.

9. Используя данные таблицы, постройте график зависимости $B = f(H)$ – кривую начального намагничивания, а по этой кривой – график зависимости $\mu = f(H)$.

10. По результатам работы сделайте выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое магнетики? Назовите их разновидности.
2. Перечислите особенности диамагнетиков и парамагнетиков.
3. Что такое ферромагнетики? Опишите их структуру.
4. Что такое спонтанная намагниченность доменов? В чем ее природа?
5. Опишите процесс начального технического намагничивания ферромагнетиков.
6. Что такое перемагничивание ферромагнетиков и петля гистерезиса?
7. Опишите связь петли гистерезиса с затратами энергии на перемагничивание ферромагнетиков.
8. В чем причина образования остаточной магнитной индукции в ферромагнетиках? Что такое коэрцитивная сила ферромагнетика. Что она характеризует?
9. Охарактеризуйте магнитную проницаемость магнетиков и ее особенность у ферромагнетиков.
10. Опишите мягкие и жесткие ферромагнетики, их применение в технике.

11. Назовите принцип получения в лабораторной установке напряжений, пропорциональных напряженности и магнитной индукции поля в образце.

12. Опишите порядок размагничивания ферромагнетика.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1978. – Т. 2 (и последующие издания этого курса).

2. *Калашников С.Г.* Электричество. – М.: Наука, 1977.

3. *Епифанов Г.И.* Физика твердого тела. – М.: Наука, 1965 (и последующие издания этого курса).

ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

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

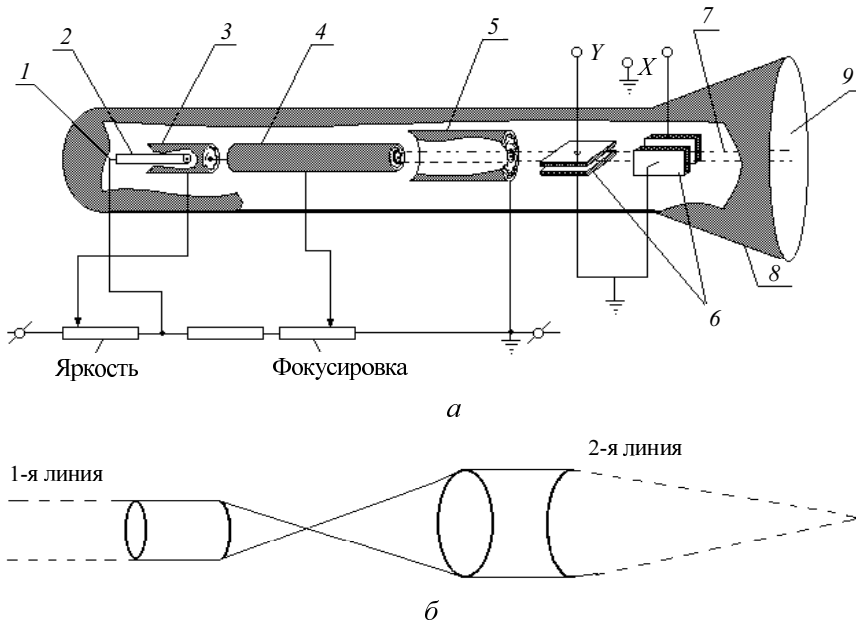


Рис. П1. Электронно-лучевая трубка:

a – конструкция; *б* – оптическая аналогия трубки

На рис. П1, *a* показана конструкция главного элемента осциллографа – электронно-лучевой трубки. Цифрами на рисунке отмечены следующие элементы: 1 – подогреватель; 2 – катод; 3 – управляющий электрод; 4 – первый анод; 5 – второй анод; 6 – отклоняющие пластины; 7 – электронный пучок; 8 – колба трубки; 9 – люминесцирующий экран.

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) представляет собой стеклянный баллон, из которого выкачан воздух до давления примерно 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), 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.

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 становится 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).

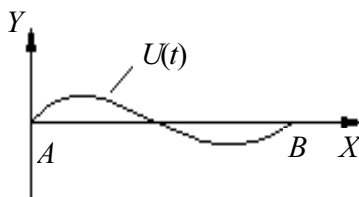


Рис. П2. Изменение напряжения от времени

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

ОПИСАНИЕ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ОСЦИЛЛОГРАФОМ С1-83

Схема осциллографа приведена на рис. П3.

1. Органы управления трактом вертикального отклонения:

- переключатели $V/\text{дел}$ 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 $V/\text{дел}$. Для достижения соответствия масштабной сетке пределов, установленных переключателями 1, 2, необходимо повернуть потенциометры по часовой стреле до предела;

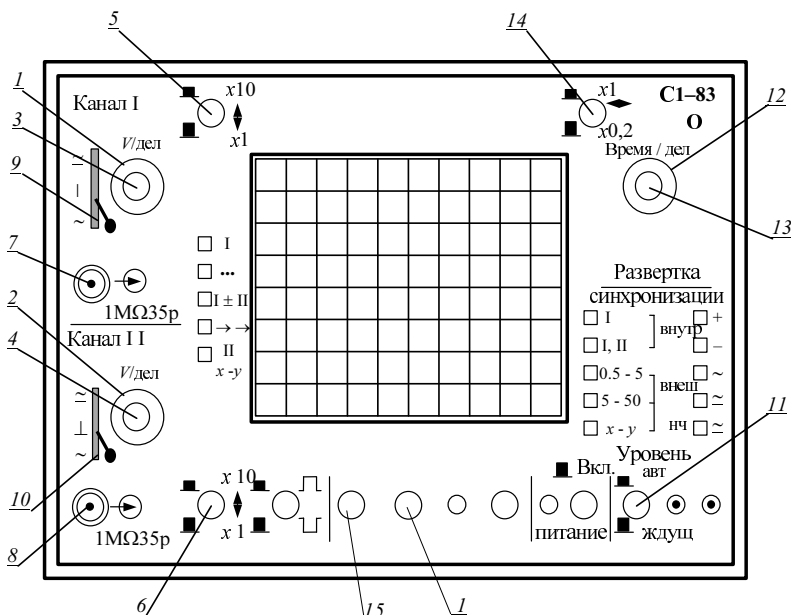


Рис. ПЗ. Схема осциллографа

- 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);

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

«⊥» – вход усилителя подключен к корпусу;

- переключатели режима работы усилителей могут находиться в положениях:

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

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

«I ± 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;

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

- переключатели инвертирования сигнала во II канале 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 11 («Уровень»), выбирающий уровень исследуемого сигнала, при котором происходит запуск развертки;

- переключатели источника синхронизации могут находиться в положениях:

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

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

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

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

«X-Y» – вход усилителя X отключается от генератора развертки и подключается к I каналу 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 «х1, х0,2», связанный с ручкой 14 и увеличивающий скорость развертки в положении «х0,2» в 5 раз;
- «Авт» – режим, вырабатывающий пилообразное напряжение независимо от запускающего сигнала;
- «Ждуш» – 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 – на вход 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).

ЛИТЕРАТУРА

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

ОПИСАНИЕ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫМ ОСЦИЛЛОГРАФОМ ОЦ12-02

Схема осциллографа приведена на рис. П4.

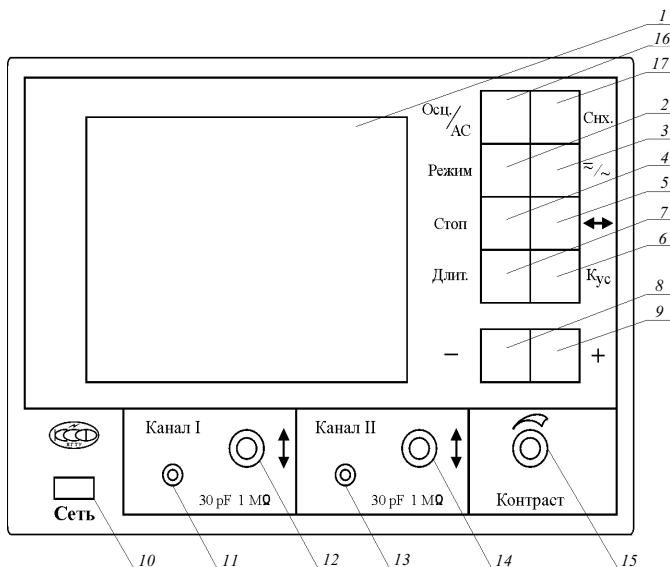


Рис. П4. Схема лабораторного осциллографа

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 канала I;
- 12 – ручка смещения канала I по вертикали;
- 13 – вход канала II;

- 14 – ручка смещения канала II 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.

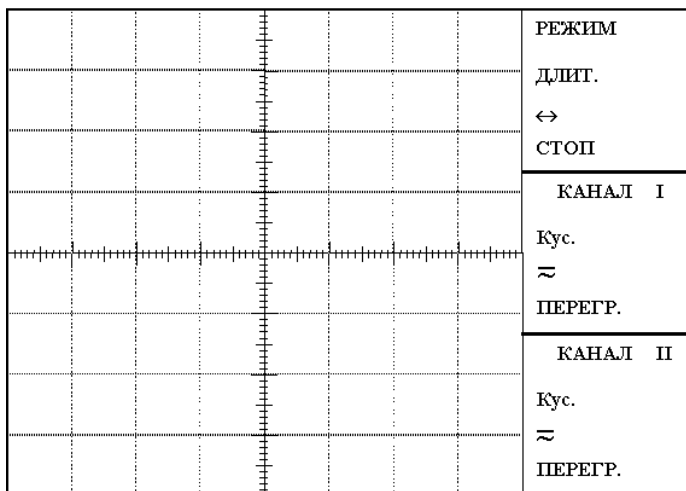


Рис. П5. Экран дисплея

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

Информационное поле разделено на три области:

- общих установок. Отображает режим работы осциллографа (строка «Режим»), временную развертку (строка «Длительность»), смещение привязки сигнала по оси времени (строка «↔») и состояние стоп-кадр (строка «стоп»);
- состояния канала I. Отображает коэффициенты отклонения канала I (строка «К_{ус}»), указатель переключателя закрытого или открытого канала, индикатор перегрузки (линия «ПЕРЕГР.»);
- область состояния канала II. Отображает информацию, аналогичную для канала I.

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 производится 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 → или ← 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 «↔».

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.

ЛИТЕРАТУРА

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

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Методические указания

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаерилова*

Подписано в печать 20.12.2012. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная
Тираж 200 экз. Уч.-изд. л. 3,95. Печ. л. 4,25. Изд. № 265. Заказ
Цена договорная

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