

53

93

Ф.50

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

*Руководство
к лабораторным занятиям
по физике*

ЧАСТЬ III

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

*Руководство
к лабораторным занятиям
по физике*

ЧАСТЬ III

Под редакцией доцента О. И. Замша

Космо 1969

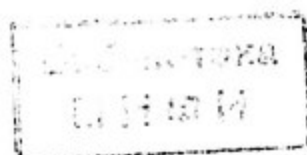
1969

Фар 1969

392/71

МОСКВА

1969



СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Методические указания	3
Правила построения и обработки графиков	4
Работа 1. Изучение электронного осциллографа	12
Работа 2. Изучение электронизмерительных приборов	26
Работа 3. Измерение сопротивлений на мосте постоянного тока	42
Работа 4. Изучение зеркального гальванометра магнитоэлектрической системы	53
Работа 5. Определение емкости конденсатора баллистическим методом	64
Работа 6. Измерение электродвижущей силы и сопротивлений компенсационным методом	71
Работа 7. Градуирование термопары	79
Работа 8. Измерение удельного заряда электрона	84
Работа 9. Исследование магнитной индукции в железе баллистическим методом	93
Работа 10. Изучение термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода	101
Работа 11. Исследование колебаний в простом колебательном контуре	107
Работа 12. Изучение резонанса напряжений и определение емкости и индуктивности методом резонанса	113
Работа 13. Релаксационный генератор	123
Работа 14. Явление Холла в металлах	131
Работа 15. Явление Холла в полупроводниках	136
Работа 16. Изучение полупроводникового выпрямителя	142
Работа 17. Температурная зависимость электропроводности полупроводников	150
Работа 18. Исследование характеристик ферромагнетиков в переменном магнитном поле	158
Приложение I.	167
Приложение II.	171
Приложение III.	174

Редактор *Н. А. Светлова*
Техн. редактор *И. М. Суровенков*

Сдано в набор 14/III 1968 г. Подписано в печать 11/VI-69 г.
Бумага 60×90/16. ̑ Объем 11 п. л. Цена 77 коп. Заказ 312 Тираж 3000 экз.

Типография МИФИ, М. Пионерская, 12

ПРЕДИСЛОВИЕ

Третья часть «Физического практикума» содержит описание лабораторных работ, выполняемых студентами Московского инженерно-физического института в третьем семестре. В этом семестре в лаборатории изучаются основные электрические явления и методы электрических измерений. На выполнение каждой работы отводится четыре академических часа. Студенты готовятся к выполнению лабораторных работ в часы самостоятельных занятий. Обработка результатов измерений и составление заключения по выполненной работе в случае необходимости также переносятся на время самостоятельных занятий. Таким образом, часы, отведенные расписанием на занятия в лаборатории, используются в основном на непосредственную экспериментальную работу на установках.

Каждый студент выполняет работы по специальному графику, причем разными студентами работы выполняются в различной последовательности. Первая и вторая работы проводятся фронтальным методом.

В описаниях лабораторных работ использована Международная система единиц СИ. Соответственно все результаты измерений должны быть записаны в этой системе единиц.

В составлении описаний принимали участие: К. Т. Басова (работы 7 и 17), Ю. А. Быковский (работы 15 и 16), А. И. Башев (работа 8), Ю. Л. Гефан (работа 1, участвовал в составлении приложений), И. А. Виноградов (работа 18), Н. И. Гольдфарб (работа 13), В. А. Гридин (работа 10), Н. С. Егорова (работы 4 и 5), О. И. Замша (работы 6, 9 и 12), И. Е. Иродов (работа 11), Ю. П. Козырев (работы 1 и 3), Н. В. Масленникова (работа 2), В. С. Моспанов (правила построения и обработки графиков), Ю. И. Плотников (работа 14), Л. В. Сулима (участвовал в составлении приложений), В. Е. Фирсова (работы 6 и 12).

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

I. Подготовка к выполнению лабораторной работы проводится студентом в часы самостоятельных занятий. Кро-

ме описания работы, в которой теория изучаемого явления изложена кратко, должны быть использованы и другие учебные пособия по электричеству и электрическим измерениям.

При подготовке к работе студент обязан вписать в лабораторный журнал:

- 1) название работы, ее номер и дату выполнения;
- 2) принципиальную и рабочую схемы установки;
- 3) расчетные формулы, в том числе и формулы расчета погрешностей;
- 4) формы таблиц для записи измерений.

К работе в лаборатории допускаются только подготовившиеся студенты.

II. Допущенный к работе студент может приступить к сборке схемы. Схема собирается без подключения источников питания. Необходимо примерно оценить порядок измеряемых величин и соответственно выбрать пределы измерений включаемых в схему электроизмерительных приборов. Если неизвестен порядок измеряемой величины, то приборы включают на максимальный предел измерений. После проверки схемы преподавателем или лаборантом включаются источники питания*.

Без проверки схемы преподавателем или лаборантом включать питание схемы категорически воспрещается.

III. Перед началом измерений необходимо записать в лабораторный журнал заводские номера всех приборов, включенных в схему, и их технические характеристики.

Выполнение лабораторной работы должно протоколироваться в лабораторном журнале. Отсчеты, как правило, должны записываться в виде таблиц, заранее продуманных и подготовленных. Все расчеты также записываются в журнале.

Графики строятся на миллиметровой бумаге карандашом или тушью и вклеиваются в журнал.

В конце работы должно быть написано краткое заключение по работе, которое составляется по следующему плану.

1. Что и каким методом определялось.
2. Какой результат и с какими абсолютной и относительной погрешностями был получен.
3. Краткое обсуждение полученного результата и анализ погрешностей.

ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ГРАФИКОВ

В экспериментальной физике результаты измерений важно представить в наглядной форме, удобной для использования и обработки. Обычно для этого составляют таблицы,

* Разборку схемы следует начинать с отключения источников питания.

графики и уравнения. Представление данных в виде таблиц облегчает сравнение различных значений, поэтому данные опыта, как правило, записываются в таблицу, которая позволяет также вести и обработку результатов измерений. Для того чтобы найти связь между переменными, строят графики. При этом функциональная зависимость становится явной, а результаты опыта наглядными. График представляет зависимость, как правило, между двумя переменными. При его построении необходимо пользоваться определенными правилами.

График выполняется на миллиметровой (или специальной) бумаге, на которую наносятся координатные оси; для независимой переменной всегда используется ось абсцисс. На оси наносится масштаб, неудачный выбор которого — одна из наиболее распространенных ошибок, зачастую обесценивающих график. Масштаб наносят так, чтобы расстояние между делениями составляло 1, 2, 5 единиц (допустимы 2, 5 и 4) или эти же цифры, умноженные на $10^{\pm n}$ (n — целое число). Число делений с цифрами на каждой оси составляет обычно от 4 до 10. В конце оси указывается откладываемая величина и ее размерность. Обычно туда же выносятся и порядок масштаба ($10^{\pm n}$). Масштаб нужно выбирать так, чтобы кривая заняла весь лист, а погрешность измерения соответствовала одному-двум мелким делениям графика. При этом начало отсчета не обязательно начинать с нуля, иногда удобнее выбрать округленное число и таким образом увеличить масштаб, но погрешность при этом должна составлять по-прежнему одно-два мелких деления. Для обработки результатов удобно, чтобы кривая была близка к прямой, наклоненной под углом 45° к оси абсцисс. Для этого на графике откладывается не сама величина, а ее функция (логарифм, обратная величина и т. д.) так, чтобы полученный график был линейным.

Точки на график нужно наносить точно и тщательно, обводя их кружком или каким-нибудь другим знаком (рис. 1). Если можно определить доверительный интервал для данного измерения или приборную ошибку, то эти величины откладываются по обе стороны от точки (рис. 2) так, чтобы точка оказалась в центре креста, образованного доверительными интервалами или приборными ошибками.

Затем наносится наиболее подходящая плавная кривая с малым числом перегибов, проходящая через доверительные интервалы как можно ближе к нанесенным точкам. На каждом участке графика точки должны располагаться примерно поровну по обеим сторонам кривой.

Исключение составляет градуировочный график (рис. 3), на котором точки соединяются последовательно прямыми линиями, так как при этом мы считаем значения величин

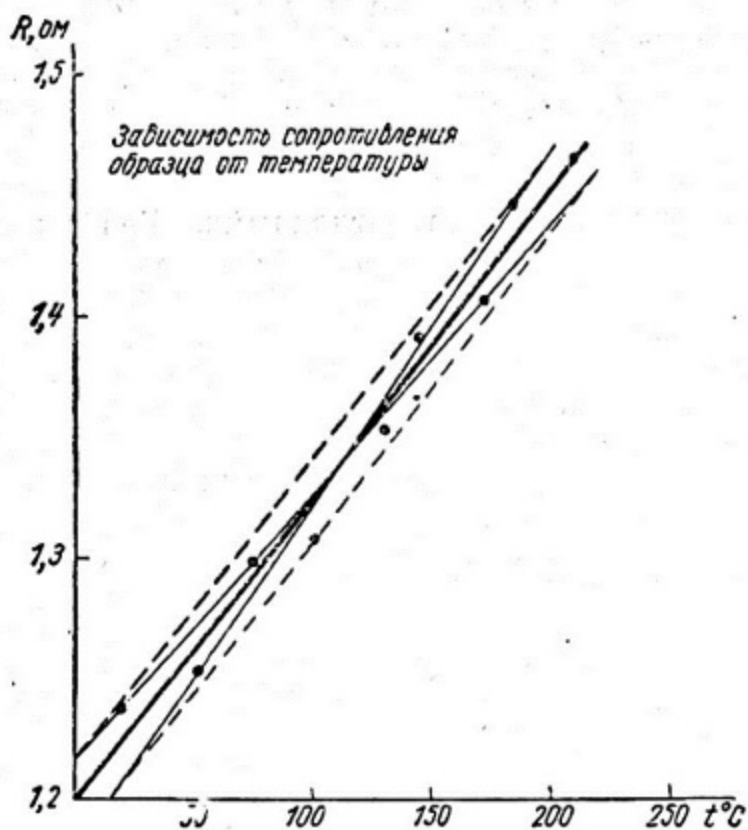


Рис. 1

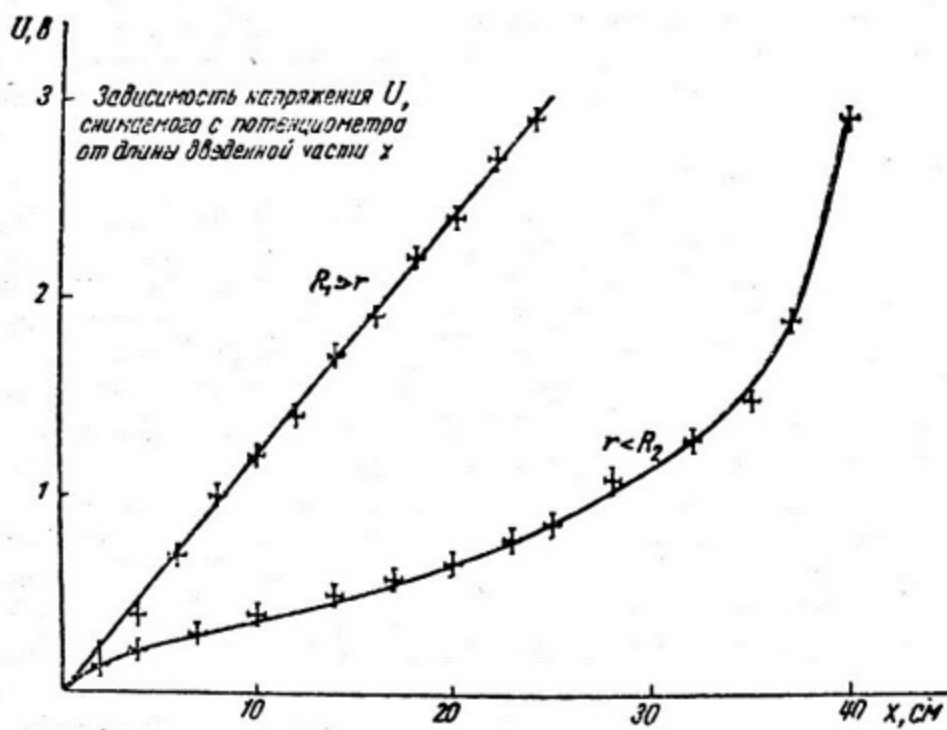


Рис. 2

точными, а кривая служит для отыскания промежуточных значений линейной интерполяцией.

Окончив построение графика, пишут заголовок (обычно в правом верхнем углу), который должен содержать точное и краткое описание того, что показывает график.

Обработка результатов сводится к выяснению аналитической зависимости между величинами. Если эта зависимость нелинейная, то обработка сложна. Остановимся на

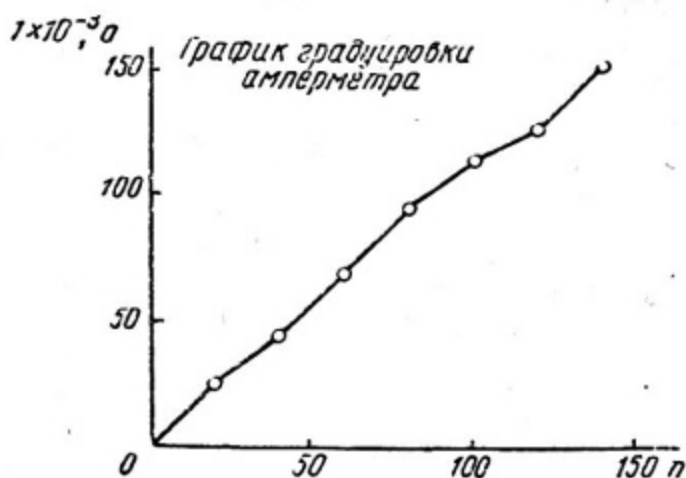


Рис. 3

случае, когда уравнение имеет вид прямой линии: $y = kx + b$. При этом угловой коэффициент k находится как отношение приращения функции к приращению аргумента, взятое по выбранной прямой на возможно большем интервале изменения аргумента:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (1)$$

Определим ошибку в k . Если известны доверительные интервалы, то через их концы проводятся две вспомогательные прямые, параллельные ранее начерченной. Крайние точки параллельных прямых соединяются крест-накрест и находятся угловые коэффициенты этих прямых k_1 и k_2 . Тогда ошибка в k примерно равна:

$$\Delta k = \frac{|k_2 - k_1|}{2}.$$

Аналогично определяется ошибка и в том случае, когда доверительные интервалы неизвестны. Вспомогательные прямые при этом проводятся через наиболее удаленные от основной прямой точки (см. рис. 1).

Более точно можно вычислить угловой коэффициент k и свободный член, если воспользоваться методом наименьших

квадратов, который заключается в нахождении таких значений k и b , при которых расстояния от прямой $y = kx + b$ до экспериментальных точек с координатами x_i и y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) были бы наименьшими. Это эквивалентно минимуму суммы

$$\sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2. \quad (2)$$

Условия минимальности суммы (2)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial k} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2 \right] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial b} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2 \right] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

дают два уравнения для определения k и b :

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_i y_i &= k \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i, \\ \sum_{i=1}^n y_i &= k \sum_{i=1}^n x_i + nb. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Если ввести обозначения средних значений x и y :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

то систему уравнений (4) можно записать в виде:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad (5)$$

$$b = \bar{y} - k\bar{x}. \quad (6)$$

Этот метод позволяет найти и ошибку в определении k и b . Однако способ определения ошибок весьма сложен, поэтому приводятся только результаты расчетов.

Средняя квадратичная ошибка углового коэффициента k равна

$$S'_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (7)$$

Средняя квадратичная ошибка свободного члена b равна

$$S'_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (8)$$

или

$$S'_b = S'_k \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (9)$$

В качестве примера рассмотрим вычисление температурного коэффициента сопротивления металла по методу наименьших квадратов. Сопротивление зависит от температуры по линейному закону:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) = R_0 + R_0 \alpha t;$$

свободный член определяет сопротивление R_0 при температуре 0°C , а угловой коэффициент — произведение температурного коэффициента α на сопротивление R_0 .

Результаты расчета приведены в таблице (см. стр. 10), из которой нетрудно найти

$$\alpha R_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(R_i - \bar{R})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = \frac{192,3}{78,424} = 0,00245 \text{ ом/град}$$

и $R_0 = 1,575 - 0,00245 \cdot 157,0 = 1,190 \text{ ом}$; отсюда $\alpha = \frac{0,00245}{1,190} = 0,00206 \text{ град}^{-1}$.

Важно вычислить ошибку в определении α . Так как

$$\alpha = \frac{\alpha R_0}{R_0},$$

то

$$S'_\alpha = \alpha \sqrt{\left(\frac{S_{\alpha R_0}}{\alpha R_0}\right)^2 + \left(\frac{S_{R_0}}{R_0}\right)^2}.$$

Расчет температурного коэффициента сопротивления по методу наименьших квадратов

Номер измерения	$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{ом}$	$t - \bar{t}$	$R - \bar{R}$	$(t - \bar{t})(R - \bar{R})$	$(t - \bar{t})^2$	t^2	$R_0 \text{ ат}$	$\left \frac{R_t - R_0}{R_0 \text{ ат}} \right $	$\left \frac{R_t - R_0}{R_0 \text{ ат}} \right ^2 10^4$
1	23	1,242	-134	-0,359	+48,2	17 956	600	0,056	0,004	0,16
2	59	1,326	-98	-0,249	+14,4	9 604	3 500	0,145	0,009	0,81
3	84	1,386	-73	-0,189	+13,8	5 329	7 100	0,201	0,005	0,25
4	96	1,417	-61	-0,158	+9,4	3 721	8 800	0,230	0,003	0,09
5	120	1,512	-3,7	-0,062	+2,3	1 369	14 400	0,294	0,028	7,84
6	133	1,520	-4	+0,015	-0,1	16	17 800	0,376	0,024	5,76
7	186	1,664	+29	+0,089	+2,5	841	34 600	0,456	0,018	3,24
8	212	1,712	+55	+0,137	+7,5	3 025	44 900	0,521	0,001	0,01
9	244	1,784	+87	-0,209	+18,2	7 569	55 700	0,602	0,008	0,64
10	270	1,823	+133	+0,248	+28,0	12 770	72 900	0,662	0,029	8,41
11	289	1,864	+132	+0,289	+38,1	17 420	83 500	0,710	0,036	12,96
Σ	1732	17,330	0	0	192,3	78 424	343 800	—	—	40,17
$\frac{1}{n} \Sigma$	157,0	1,575	0	0	—	—	—	—	—	—

Пользуясь таблицей, находим:

$$S'_{\alpha R_0} = \sqrt{\frac{40,17 \cdot 10^{-4}}{9 \cdot 78400}} = 0,76 \cdot 10^{-4},$$

$$S'_{R_0} = 0,76 \cdot 10^{-4} \sqrt{343800} = 0,046,$$

$$S'_\alpha = 0,94 \cdot 10^{-4}.$$

По этим данным нетрудно определить доверительные интервалы для исследуемых величин, умножая найденные среднеквадратичные ошибки на коэффициенты Стьюдента.

Работа 1

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Электронный осциллограф — электроизмерительный прибор, предназначенный для наблюдения (а при необходимости и фотографирования) электрических процессов. С помощью осциллографа можно исследовать форму кривых, описывающих процесс, измерить длительность процесса в целом и отдельных его элементов, измерить амплитуду процесса, частоту и т. д.

Целью работы является ознакомление с принципом действия осциллографа, а также с некоторыми методами исследований электрических процессов с помощью осциллографа.

ОСНОВНЫЕ БЛОКИ (УЗЛЫ) И БЛОК-СХЕМА ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Основные блоки электронного осциллографа: электронно-лучевая трубка, усилители входных сигналов, генератор развертки и блок питания.

Электронно-лучевая трубка

Электронно-лучевая трубка является центральным блоком осциллографа. На рис. 1.1 схематически изображена конструкция трубки. Внутри стеклянного баллона, имеющего форму конуса, переходящего в цилиндр, укреплены электронная пушка и две пары отклоняющих пластин. На внутренней стенке лобовой части баллона (экране) нанесен специальный состав, светящийся под действием падающих на него электронов. Проводники от электродов пушки и отклоняющих пластин выведены через стекло баллона в так называемой ножке и оформлены снаружи в виде цоколя трубки. Внутренний объем трубки откачан до высокого вакуума.

Электронная пушка создает поток электронов и преобразует его в луч. Электроны, излученные катодом 1 (см. рис. 1.1), ускоряются и фокусируются в тонкий электронный луч при помощи цилиндрических электродов 2, 3 и 4 (управляющего

электрода, первого и второго анодов). Конструкция пушки позволяет производить регулировку яркости и размеров светящегося пятна, создаваемого электронным лучом на экране осциллографа.

Внутренние стенки стеклянного баллона покрывают тонким проводящим слоем, который используется для отвода во внешнюю цепь вторичных электронов, выбиваемых электрона-

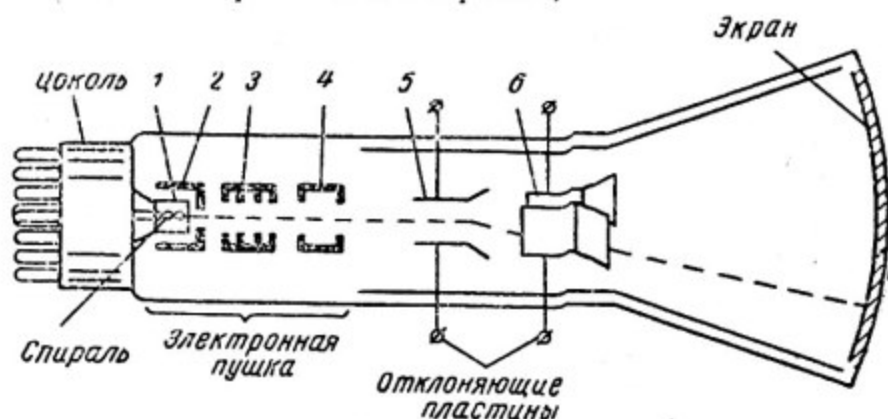


Рис. 1.1

ми луча с поверхности экрана, а также для экранирования луча от внешних полей. Иногда к этому слою подводится постоянное высокое напряжение, и он используется в качестве одного из анодов трубки.

Управление электронным лучом, т. е. перемещение его по экрану в двух взаимно перпендикулярных направлениях, осуществляется при помощи электростатических или магнитных полей, созданных на пути движения электронного луча к экрану. При электростатическом отклонении на пути электронного луча помещают отклоняющие пластины 5 и 6. Каждая пара отклоняющих пластин представляет собой плоский конденсатор, создающий однородное электрическое поле на пути луча. Электронный луч последовательно проходит сначала между первой, а затем между второй парами пластин, расположенными во взаимно перпендикулярных плоскостях. Электрическое поле между пластинами каждой пары вызывает отклонение электронного луча и перемещение светящегося пятна на экране трубки. При этом вертикально расположенные пластины вызывают отклонение луча в горизонтальном направлении (X-пластины), горизонтально расположенные пластины — в вертикальном (У-пластины). Отклонение пятна на экране пропорционально величине напряжения, приложенного к пластинам, и, следовательно, положение пятна на экране в каждый момент времени однозначно определяется в прямоугольной системе координат величинами и знаками напряжений на отклоняющих пластинах. Таким

образом, благодаря наличию в электронно-лучевой трубке двух взаимно перпендикулярных систем, управляющих электронным лучом, и люминесцирующего экрана удается получить видимое изображение графика функции, связывающей два переменных электрических сигнала, подаваемых на системы, отклоняющие луч.

Различают два основных режима работы осциллографа. В первом режиме на отклоняющие системы трубки подаются два внешних сигнала. Во втором режиме исследуется лишь один внешний сигнал. При этом в качестве второго сигнала используется выходное напряжение имеющегося в осциллографе генератора развертки, обеспечивающее перемещение луча по известному закону. Так как чаще всего интересуются исследованием внешнего сигнала как функции времени, то выходное напряжение генератора развертки делают линейно меняющимся со временем.

Генератор развертки

Генератор развертки, называемый иначе генератором пилообразного напряжения, дает импульсы напряжения пилообразной формы.

На рис. 1.2 показана принципиальная схема генератора, собранного на тиратроне. (Тиратроном называют газоразрядную лампу с управляющей сеткой.) Если на схему по-

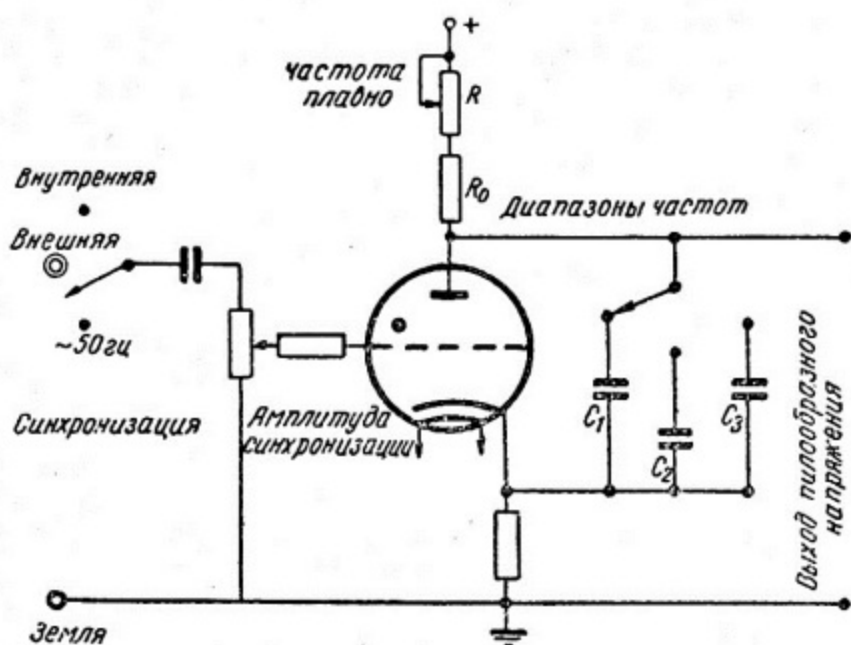


Рис. 1.2

дать постоянное напряжение, то конденсатор C (C_1 , C_2 или C_3 в зависимости от положения переключателя диапазонов) начнет заряжаться со скоростью, определяемой постоянной

времени RC -цепи. Когда напряжение на конденсаторе достигает напряжения зажигания тиратрона, тиратрон начинает проводить ток, и конденсатор быстро разряжается до напряжения гашения тиратрона. После этого весь цикл повторяется. На конденсаторе возникают колебания напряжения пилообразной формы (рис. 1.3). При зарядке конденсатора напряжение на нем изменяется по экспоненциальному закону. При получении колебаний пилообразной формы ис-

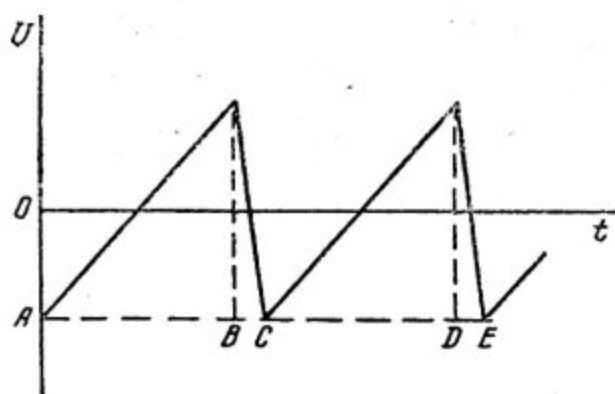


Рис. 1.3

пользуется небольшой, почти прямолинейный участок экспоненты, и поэтому напряжение на участках AB , CD и т. д. возрастает по линейному закону. Частоту пилообразных колебаний регулируют подбором величин емкости C и сопротивления R .

Напряжение от генератора развертки подают на пластины, вызывающие отклонение луча по оси X . Под действием напряжения пилообразной формы луч движется медленно с постоянной скоростью в одном направлении (интервалы времени AB , CD и т. д.) и затем быстро возвращается назад в исходное положение (интервалы времени BC , DE и т. д.) Медленное движение луча называется прямым ходом, а быстрое — обратным ходом луча. Если на Y -пластины напряжение не подано, то при прямом ходе луч на экране осциллографа вычерчивает горизонтальную линию — линию развертки. Обратный ход луча на экране трубки не виден, так как в осциллографе имеется специальное устройство, гасящее луч во время обратного хода (блок гашения обратного хода). Пилообразное напряжение делают симметричным относительно нуля (см. рис. 1.3), поэтому при выключенной развертке луч находится в центре экрана.

Одновременно подавая на X -пластины напряжение от генератора развертки и на Y -пластины исследуемое напряжение, получают на экране осциллографа кривую изменения исследуемого напряжения во времени.

Если исследуемый периодический процесс имеет период, равный или кратный периоду пилообразных колебаний, то начало каждого цикла движения луча по экрану будет происходить при одной и той же фазе исследуемого напряжения. Все циклы при этом будут точно налагаться друг на друга, и изображение их на экране (осциллограмма) будет казаться неподвижным. Однако из-за возможной нестабильности частоты генератора развертки или исследуемых колебаний соотношение периодов может несколько меняться. В этом случае картина на экране будет нестабильной.

Для получения стабильной осциллограммы служит блок синхронизации. Принцип его работы заключается в том, что при небольших различиях частоты генератора развертки и частоты исследуемых колебаний можно навязать генератору развертки исследуемую частоту. Для этого на сетку тиратрона подается специальное синхронизирующее напряжение (см. рис. 1.2). Напряжение зажигания тиратрона при этом несколько изменится. Синхронизирующее напряжение может быть подобрано так, что зажигание и гашение тиратрона будет происходить в такт с исследуемым процессом.

Синхронизация может производиться исследуемым сигналом (внутренняя синхронизация) или напряжением от внешнего источника, создающего стабильные колебания, частота которых равна или кратна частоте исследуемого процесса (внешняя синхронизация).

Усилители входных сигналов

Имеющиеся в осциллографе усилители позволяют усилить исследуемые сигналы перед подачей их на отклоняющие пластины.

Блок питания

Блок питания обеспечивает напряжением постоянного тока все цепи ламповой схемы прибора и электронно-лучевой трубки. Блок питания состоит из выпрямителя для питания ламповой схемы и высоковольтного выпрямителя для трубки.

На рис. 1.4 дана блок-схема осциллографа. Исследуемые сигналы подаются на входы 1 и 2 усилителей У1 и У2. После усиления сигналы поступают на отклоняющие системы электронно-лучевой трубки. Переводя переключатель П из положения 1 в положение 2, можно подать на вход усилителя У2 сигнал от генератора развертки, это соответствует переходу от режима, условно названного «первым», ко «второму».

Помимо указанных основных блоков в осциллографе используется и ряд дополнительных устройств.

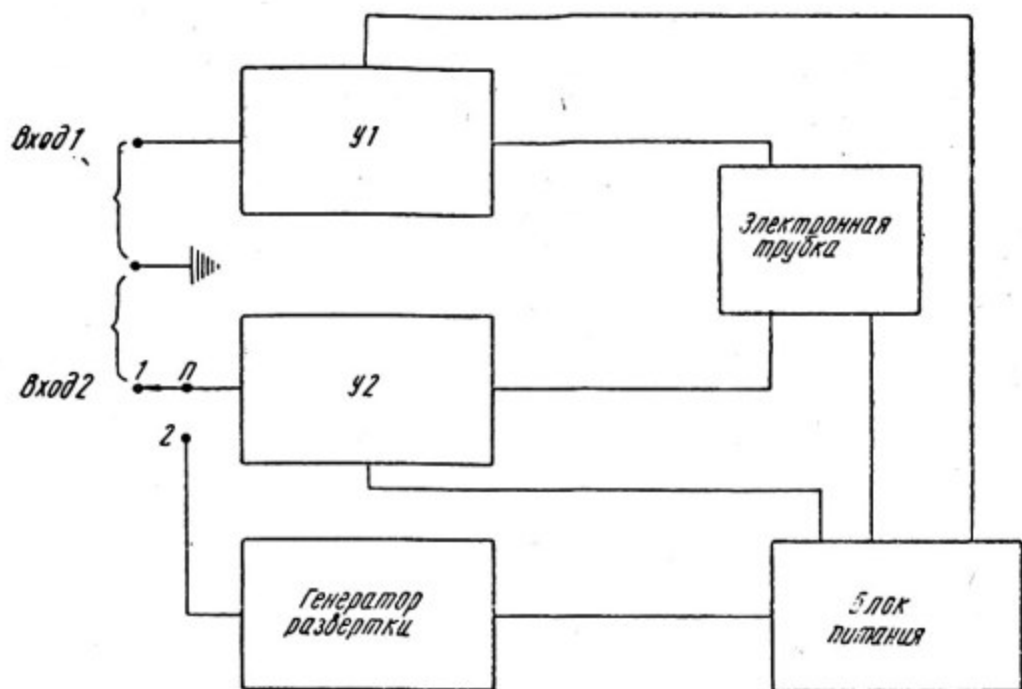


Рис. 1.4

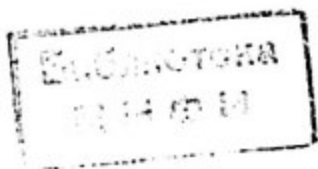
ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОСЦИЛЛОГРАФОВ

Чувствительность осциллографа, т. е. величина отклонения луча по экрану, выраженная в миллиметрах, при напряжении 1 в на данном входе осциллографа.

Чувствительность осциллографа можно изменять с помощью регулировки коэффициента усиления усилителя на соответствующем входе. Для характеристики осциллографа указывается величина максимальной чувствительности, измеренная при максимальном коэффициенте усиления соответствующего усилителя. Коэффициент усиления на разных частотах, вообще говоря, различен. Поэтому чувствительность осциллографа зависит от частоты исследуемого сигнала.

Не следует путать чувствительность осциллографа с чувствительностью трубки, которая определяется как отклонение луча на экране при напряжении 1 в на соответствующей паре пластин. Чувствительность трубки по каждой паре пластин не одинакова, большей чувствительностью обладает более удаленная от экрана пара отклоняющих пластин. Поскольку коэффициент усиления усилителей осциллографа обычно велик, то чувствительность осциллографа превосходит чувствительность трубки на несколько порядков.

Минимальное время развертки (или обратная ему величина — максимальная частота развертки).



Полоса пропускания — диапазон частот сигналов, исследование которых возможно на данном типе осциллографа. Этот параметр обычно указывают для У-входа (т. е. для У-усилителя).

Коэффициент усиления усилителей показывает, во сколько раз может быть усилен исследуемый сигнал. Указывается обычно для обоих усилителей.

НЕКОТОРЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОСЦИЛЛОГРАФА

Измерение напряжений

Переменное напряжение подается на У-вход (наиболее чувствительный). Если напряжение на Х-пластины (от генератора развертки или от внешнего источника) не подано, то луч будет чертить на экране вертикальный отрезок прямой. Напряжение можно определить как

$$U = \frac{h}{S}, \quad (1.1)$$

где h — длина отрезка прямой; S — чувствительность осциллографа.

Указанным методом определяется максимальное значение напряжения. Если подано напряжение синусоидальной формы, то по формуле (1.1) определяется удвоенная величина амплитуды напряжения.

Форму зависимости напряжения от времени можно установить, включив генератор развертки.

Постоянное напряжение подается непосредственно на пластины трубки (клеммы пластин расположены под крышкой на задней стенке осциллографа). Чувствительность электронных трубок весьма низкая, поэтому такого рода измерения производятся редко. В данном случае лучше использовать осциллограф, имеющий усилитель постоянного тока, тогда постоянное напряжение можно подавать на вход осциллографа, а не на пластины трубки.

Основное преимущество осциллографа перед другими приборами, измеряющими напряжение, состоит в том, что при необходимости, наблюдая на экране исследуемую кривую, можно измерить напряжение в различные моменты времени, т. е. в отдельных точках кривой. Также к числу преимуществ следует отнести высокое входное сопротивление, безынерционность, возможность исследования отдельных импульсов. Исследование одиночных импульсов наиболее удобно и просто осуществляется с помощью осциллографа со ждущей разверткой. Запуск такой развертки производится самим исследуемым импульсом.

Основные недостатки осциллографа как измерителя напряжений: сравнительно высокая погрешность вследствие неточности отсчета, нестабильность коэффициентов усиления усилителей, непостоянство чувствительности трубки.

Измерения частоты

Если исследуемое напряжение имеет произвольную форму, то осциллограф используется во «втором» режиме, т. е. на У-вход подается исследуемое напряжение, а на Х-вход напряжение от генератора развертки. По числу периодов исследуемого напряжения, укладывающихся на одном горизонтальном ходе луча, можно судить о частоте исследуемого напряжения. При этом, разумеется, необходимо иметь точные сведения о частоте, которую дает генератор развертки, для чего (если заводская градуировка вызывает сомнения) необходимо генератор градуировать.

Если исследуемое напряжение имеет синусоидальную форму и частота его кратна 50, то лучше работать в «первом» режиме, т. е. исследуемое напряжение подать на У-вход, а на Х-вход подать стандартный сигнал с частотой 50 гц. В качестве такого сигнала можно использовать имеющийся у некоторых типов осциллографов так называемый контрольный сигнал. Можно также использовать напряжение от сети питания с частотой 50 гц или сигнал той же частоты от генератора синусоидальных колебаний. По форме полученных фигур Лиссажу можно определить частоту исследуемого сигнала.

Если частота исследуемого сигнала не кратна 50 или же кратность так велика, что получаются фигуры Лиссажу слишком сложной формы, то в качестве эталонного синусоидального сигнала можно применить сигнал от любого генератора синусоидальных колебаний, если его градуировка достаточно надежна. В противном случае требуется предварительная градуировка генератора.

З а д а н и е

1. Ознакомление с органами управления и регулировки осциллографа

На рис. 1.5 изображена передняя панель серийного осциллографа ЭО-7. На передней панели осциллографа расположены экран трубки и основные ручки управления. Функции ручек обозначены надписями. Ручки «Фокус» и «Яркость» служат для фокусировки и регулировки яркости луча. При повороте ручек «Ось Х» и «Ось У» луч смещается по оси Х и по оси У. Ручки регулировки частоты развертки располо-

жены в центре панели. Переключатель «Диапазон частот» служит для ступенчатого переключения диапазонов частоты. Плавная регулировка осуществляется ручкой «Частота плавно».

Сигнал на У-вход подается на левые клеммы «Вход» и «Земля». Амплитуда сигнала регулируется переключателем «Ослабление» (грубая регулировка) и ручкой «Усиле-

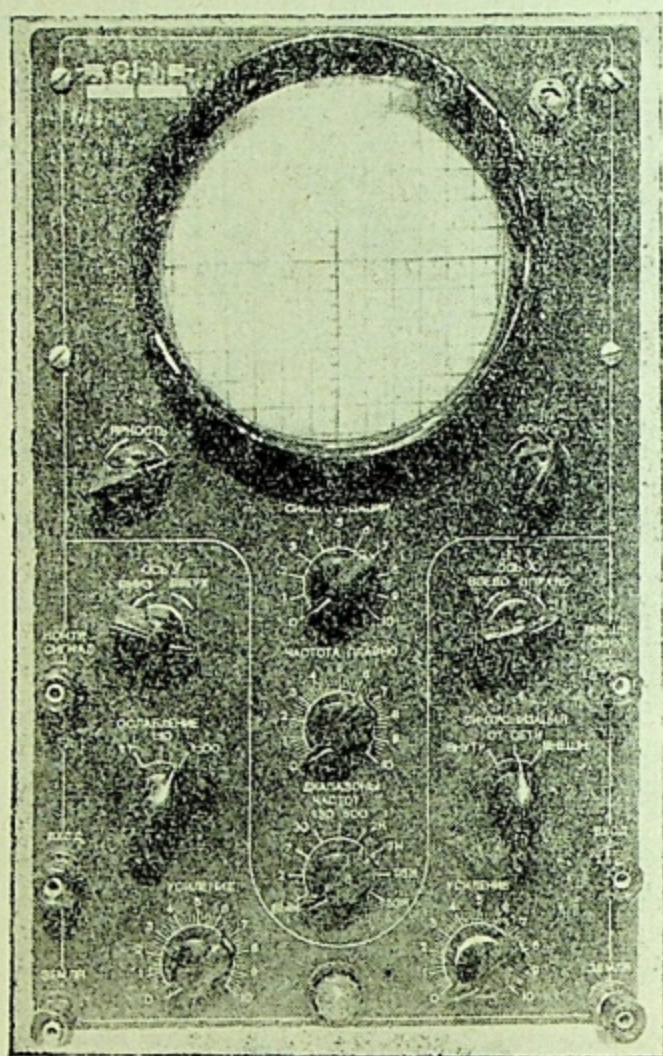


Рис. 1.5

ние» (плавная регулировка), расположенной в левой части панели.

Сигнал на Х-вход подается на правые клеммы «Вход» и «Земля». Амплитуда сигнала регулируется ручкой «Усиление», помещенной в правой части панели. Переключатель «Синхронизация» и ручка «Амплитуда синхронизации» используются для синхронизации частоты развертки с частотой

той сигнала, подаваемого на У-вход. В зависимости от положения переключателя синхронизацию можно производить напряжением исследуемого сигнала (положение переключателя «Внутр.»), напряжением от сети или от внешнего источника. Кроме того, на панели расположены тумблеры включения сети и включения луча, а также клеммы для подключения к контрольному сигналу и внешней синхронизации.

2. Включение и настройка осциллографа

Перед включением осциллографа следует установить ручки регулировки в следующие положения: регулятор яркости — в крайнее правое положение (т. е. на максимальную яркость); регулятор фокусировки — в среднее положение; усиление по оси У — в нулевое положение; усиление по оси Х — на 2—3 деления; переключатель диапазонов развертки — в положение 30—130. Вилку шнура питания включить в сеть. Включить тумблер «Сеть» (верхнее положение). Должна загореться контрольная лампочка на передней панели. Дать на прогрев 2—3 минуты. Включить тумблер «Луч». На экране должна появиться яркая линия. Если линия не появилась, то это обычно является следствием слишком большого отклонения луча (за пределы экрана трубки). Для возвращения луча регулятор усиления по оси У устанавливают в разные положения через каждые 20—30° и в каждом из положений поворачивают регулятор усиления по оси Х на полный его ход. После нахождения линии уменьшают яркость и регулируют фокусировку до получения максимально четкого изображения.

Соединить проводником клемму «Контр. сигнал» с клеммой У-вход (переключатель «Ослабление» в положении 1:1). Вращением ручки «Частота плавно» и ручки «Амплитуда синхронизации» получить неподвижную картину (переключатель «Синхронизация» в положении «Сеть» или «Внутр.»). Регуляторами усиления по осям Х и У установить желаемые размеры изображения контрольного сигнала. Исследовать влияние различных регуляторов на изображение.

Изменяя частоту развертки, получить на экране осциллографа 0,5; 1; 2; 3; 4 и т. д. полных синусоидальных колебания.

3. Измерение чувствительности осциллографа

Измерить чувствительность осциллографа при максимальном усилении по Х- и У-входу и при положении переключателя «Ослабление сигнала» 1:1. Эти измерения проводятся при выключенном генераторе развертки (крайнее левое положение ступенчатого переключателя диапазонов частоты развертки).

Для измерения чувствительности по оси У подать синусоидальное напряжение известной амплитуды на У-вход. В качестве источника напряжений используется звуковой генератор ЗГ-12М, правила работы с которым даны в приложении I. Измерения провести на частоте сигнала генератора 1 кГц.

Получить вертикальную прямую (штрих) на экране осциллографа. Для уменьшения относительной погрешности измерения необходимо стремиться, чтобы длина штриха и отклонение стрелки вольтметра на звуковом генераторе были как можно больше. Измерить величину штриха h и записать соответствующее показание вольтметра звукового генератора. Измерение провести не менее трех раз. Вычислить чувствительность осциллографа по оси У по формуле

$$S = \frac{h}{2U_m} \text{ м.м./в.}$$

Метод расчета амплитудного напряжения U_m на выходе звукового генератора дан в приложении I.

Подать известное напряжение на Х-вход и аналогичным методом определить чувствительность по оси Х.

4. Измерение чувствительности трубки осциллографа

На задней панели осциллографа расположены гнезда Х и У, к которым подключены отклоняющие пластины, а также тумблеры, включающие усилители, которые усиливают сигналы, поступающие на отклоняющие пластины. Для измерения чувствительности Х-пластин, необходимо напряжение от звукового генератора подать на гнезда Х и выключить усилитель, для чего соответствующий тумблер «Усил.» поставить вверх. Измерения производятся так же, как в задании 3. При измерении чувствительности У-пластин напряжение от звукового генератора подается на гнезда У и выключается соответствующий усилитель. Измерения производятся так же, как и при измерении чувствительности Х-пластин.

5. Градуировка генератора развертки

Градуировка генератора развертки заключается в определении частоты развертки в зависимости от положения переключателей частот генератора развертки (ступенчатого и плавного). Градуировку провести при положении переключателя диапазонов частоты 30—130.

Включить развертку и установить переключатель диапазонов частоты в заданное положение. На У-вход подать си-

нусоидальное напряжение от звукового генератора. Подобрать частоту сигнала такой, чтобы при выбранном положении ручки плавного регулятора частоты на экране осциллографа наблюдалось целое число синусоидальных колебаний. По известной частоте сигнала звукового генератора определить частоту развертки. Измерения должны быть проведены для различных положений плавного переключателя развертки.

Построить градуировочный график, откладывая по оси абсцисс положение ручки плавной регулировки частоты развертки, а по оси ординат — измеренную частоту.

Примечание. При измерениях частоты развертки синхронизация развертки должна быть выключена, т. е. регулятор «Амплитуда синхронизации» должен быть в крайнем левом положении.

6. Градуировка генератора звуковых частот

Контрольный сигнал дает синусоидальное напряжение с частотой 50 гц. Пользуясь этим сигналом как эталонным, проверить градуировку звукового генератора.

Для этого на У-вход осциллографа подать синусоидальное напряжение от звукового генератора, а Х-вход соединить с клеммой «Контрольный сигнал». Подобрать такую частоту сигнала от звукового генератора, чтобы на экране осциллографа получилась замкнута кривая (фигура Лиссажу).

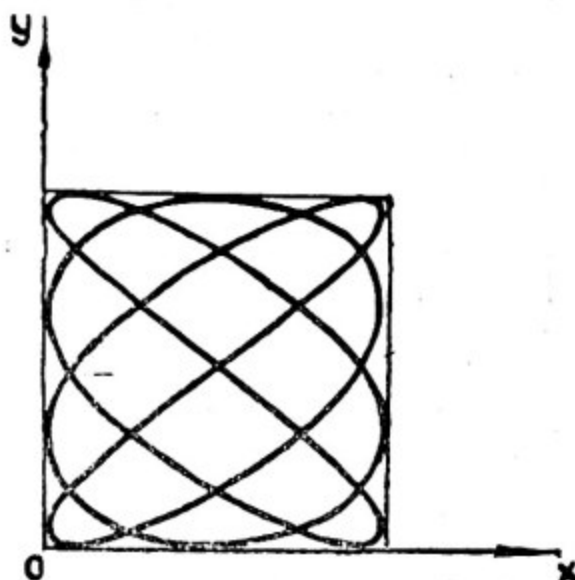


Рис. 1.6

В этом случае отношение частот складываемых взаимно перпендикулярных колебаний равно отношению малых целых чисел. На рис. 1.6 показана фигура Лиссажу, соответствующая отношению частот 3:4.

При определении отношения частот рекомендуется использовать следующее правило. Проводятся координатные оси X и Y, причем начало координат смещено так, как показано на рис. 1.6. Если число касаний кривой с осью Y равно n_y и с осью X равно n_x , то частоты ν_y и ν_x связаны соотношением

$$\frac{\nu_y}{\nu_x} = \frac{n_x}{n_y}.$$

Если одна из частот складываемых колебаний (например, ν_x) известна, то, пользуясь этим соотношением, можно определить неизвестную частоту ν_y .

Изменяя частоту сигнала звукового генератора (поворотом лимба генератора), получить ряд фигур Лиссажу и по их форме определить частоту сигнала звукового генератора при данном положении его лимба. Сфотографировать или зарисовать наблюдаемые фигуры Лиссажу. Построить градуировочный график, откладывая по оси абсцисс деление лимба звукового генератора, а по оси ординат — соответствующие частоты.

7. Синхронизация исследуемого сигнала

В данном задании в качестве исследуемого сигнала берут синусоидальное напряжение контрольного сигнала осциллографа. Для синхронизации используют напряжение от звукового генератора. Соединить клемму «Контр. сигнал» с У-входом осциллографа, а на X-вход подать напряжение от звукового генератора. Выключить генератор развертки осциллографа. Включить звуковой генератор (переключатели «Затухание, дБ» должны быть на нуле, а переключатель «Вых. сопротивлен.» поставить в положение 600). Вращая лимб звукового генератора, получить на экране эллипс. Этим достигается равенство частот исследуемого и синхронизирующего сигналов. (Можно так же получить любую другую фигуру Лиссажу, в этом случае частоты будут кратными.)

Переключить синхронизирующее напряжение от звукового генератора на клеммы «Внешн. синх.» и «Земля», поставить переключатель «Синхронизация» в положение «Внешн.», переключатель «Амплитуда синхронизации» — в среднее положение, переключатель «Диапазоны частоты» — в положение, соответствующее частоте исследуемого сигнала. Установить минимальное напряжение на выходе звукового генератора. Вращая ручку «Частота плавно», получить на экране осциллографа бегущую картину. Постепенно увеличивая синхронизирующее напряжение, добиться неподвижности осциллограммы.

Измерить амплитуду синхронизирующего напряжения. Для этого переключатель «Амплитуда синхронизации» по-

вернуть вправо до конца и произвести отсчет на вольтметре звукового генератора. Повысить синхронизирующее напряжение и убедиться в том, что при больших напряжениях осциллограмма искажена. Это объясняется тем, что чрезмерная синхронизация вызывает искажение пилообразного напряжения генератора развертки.

Работа 2

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

ВВЕДЕНИЕ

Электроизмерительным прибором называется устройство, предназначенное для измерения электрических величин — тока, напряжения и т. п. Все электроизмерительные приборы подразделяются на приборы непосредственной оценки и приборы сравнения. В приборах первого типа измеряемая величина отсчитывается по показаниям предварительно отградуированных приборов. В приборах второго типа в процессе измерения производится прямое сравнение с эталонной мерой (компенсаторы, мосты). В данной работе будут рассмотрены электроизмерительные приборы непосредственной оценки.

Основными данными, характеризующими электроизмерительный прибор, являются: система, класс точности, пределы измерения и чувствительность (для гальванометров). Все эти данные обычно отмечены на шкале прибора условными знаками.

Из основных технических требований, предъявляемых к электроизмерительным приборам, следует указать следующие: необходимо, чтобы прибор потреблял малую мощность и не вносил заметных изменений в электрическую цепь.

Электроизмерительный прибор состоит из подвижной и неподвижной частей. По величине перемещения подвижной части судят о величине измеряемого тока, напряжения, мощности. В зависимости от того, какое физическое явление положено в основу действия прибора, электрические измерительные приборы разделяются на следующие системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, ферродинамическую, индукционную, термоэлектрическую, вибрационную, тепловую, детекторную, электронную, фотоэлектрическую, электролитическую, электростатическую.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Класс точности

Согласно ГОСТ 1845—59 все электроизмерительные приборы разделяются на 8 классов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Принадлежность прибора к данному классу характеризуется наибольшим допустимым значением приведенной погрешности, которая определяется по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_m} \cdot 100\%,$$

где γ — приведенная погрешность, выраженная в процентах; ΔA — максимальная абсолютная погрешность; A_m — верхнее значение показаний прибора.

Пример. Миллиамперметром на 75 *ма* измерен ток 30 *ма*. Класс точности прибора 0,2, т. е. приведенная погрешность 0,2%. Это означает, что при измерении любого тока в пределах 0—75 *ма* максимальная абсолютная погрешность равна $\Delta A = \pm 0,15$ *ма*. Следовательно, возможная относительная погрешность измерения

$$E = \frac{0,15}{30} 100\% = 0,5\%.$$

Чувствительность

Чувствительностью электроизмерительного прибора называется отношение линейного или углового перемещения указателя к измеряемой величине, вызвавшей это перемещение, т. е.

$$S = \frac{n}{x},$$

где n — угловое или линейное перемещение; x — измеряемая величина.

Пример. При измерении тока $I = 2,5$ *а* указатель прибора изменил свое положение на $n = 50$ делений. Следовательно, чувствительность прибора по току будет равна

$$S_I = \frac{n}{I} = \frac{50}{2,5} = 20 \text{ дел/а}.$$

Пределы измерений

Значение измеряемой величины, при котором стрелка прибора отклоняется до конца шкалы, называется пределом измерения этого прибора.

Электроизмерительные приборы могут иметь несколько пределов измерений (так называемые многопредельные приборы). Необходимо помнить, что при измерениях таким прибором на различных пределах цена деления будет различна, поэтому необходимо уметь определять цену деления.

Цена деления прибора равна значению измеряемой величины, соответствующему одному делению шкалы прибора.

Пример. Амперметр с наружным шунтом имеет два предела измерений 15 и 30 а. Шкала имеет 150 делений.

Цена деления для предела 15 а равна 0,1 а/дел, для предела 30 а равна 0,2 а/дел.

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Приборы магнитоэлектрической системы

Работа приборов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии поля постоянного магнита и измеряемого тока, проходящего по обмотке подвижной катушки, помещенной в этом поле.

На рис. 2.1 схематически показано устройство наиболее распространенного вида магнитоэлектрического прибора. Сильный постоянный магнит 1 из высококоэрцитивной стали

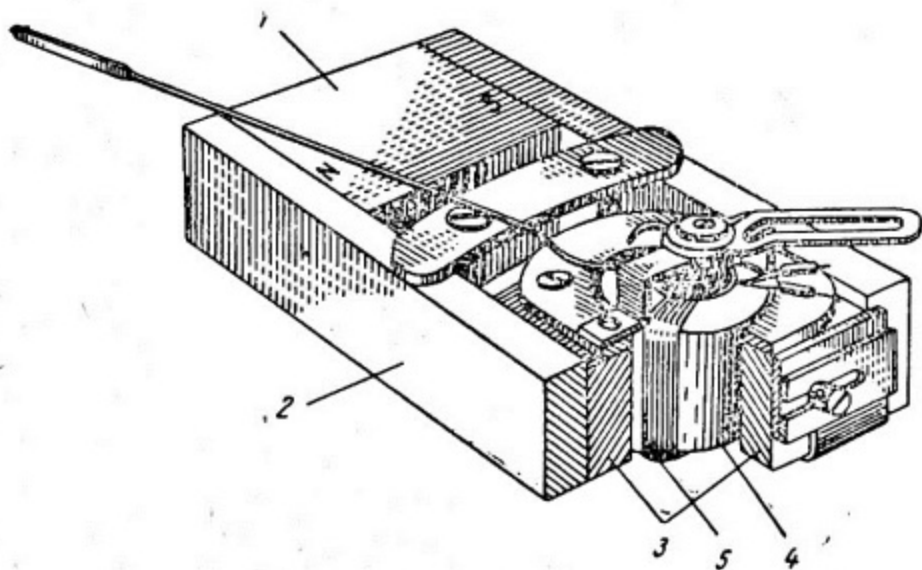


Рис. 2.1

скреплен с магнитопроводом 2 и полюсными наконечниками 3 из магнитомягкой стали. Между полюсными наконечниками укреплен цилиндрический сердечник 4 тоже из магнитомягкой стали. Подвижная катушка (рамка) 5 из тонкого медного или алюминиевого провода намотана на легкий алюминиевый каркас.

На оси подвижной части укреплена стрелка, конец которой перемещается по шкале прибора. Для создания противодействующего момента и одновременно для подвода тока в обмотку рамки служат две спиральные пружины.

Электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы используются для измерений в цепях постоянного тока. Достоинствами приборов этой системы являются: высокая точность (класс точности до 0,05), высокая чувствительность, малое собственное потребление мощности, устойчивость к перегрузкам, равномерность шкалы и малая чувствительность к внешним магнитным полям.

Приборы электромагнитной системы

Работа приборов электромагнитной системы основана на воздействии на подвижную часть прибора магнитного поля, создаваемого измеряемым током при прохождении его по обмотке неподвижной катушки.

В настоящее время применяются два типа приборов этой системы: приборы с круглой катушкой и приборы с плоской катушкой. На рис. 2.2 схематически показан прибор с круг-

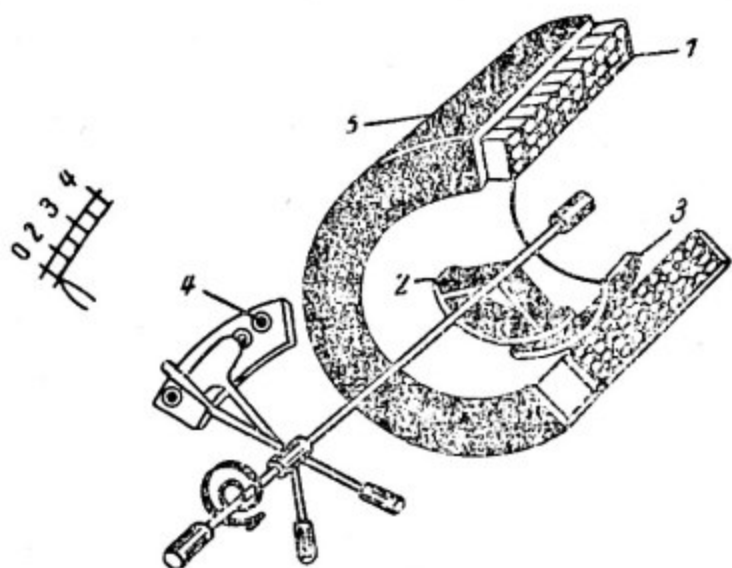


Рис. 2.2

лой катушкой. Внутри катушки 1 помещены два сердечника из магнитомягкой стали: подвижный 2, укрепленный на оси, и неподвижный 3. На оси также укреплены стрелка и грузики для уравнивания подвижной части системы. Когда по катушке 1 проходит ток, оба сердечника намагничиваются и отталкивание их одноименных полюсов создает вращающий момент, поворачивающий сердечник 2. Противодейст-

вующий момент создается спиральной пружиной. В этом приборе имеется магнитиндукционный успокоитель 4. Ферромагнитный экран 5, надетый непосредственно на катушку, защищает ее от внешних магнитных полей.

Электроизмерительные приборы этой системы пригодны для измерений в цепях постоянного и переменного токов, но практически они применяются преимущественно для переменного тока. Собственное потребление энергии невелико, но больше, чем у приборов магнитоэлектрической системы. Приборы этой системы отличаются простотой и надежностью конструкции, устойчивы к перегрузкам.

К числу недостатков приборов следует отнести относительно низкую точность (класс точности 1,0—2,5), чувствительность к внешним магнитным полям, непригодность для измерения малых токов и низких напряжений, неравномерность шкалы (однако новейшие приборы повышенного класса точности имеют значительную часть шкалы практически равномерную).

Приборы электродинамической системы

Действие приборов электродинамической системы основано на взаимодействии токов, текущих по подвижной и неподвижной катушкам (рис. 2.3).

В измерительных приборах электродинамической системы различают две разновидности, отличающиеся между собой

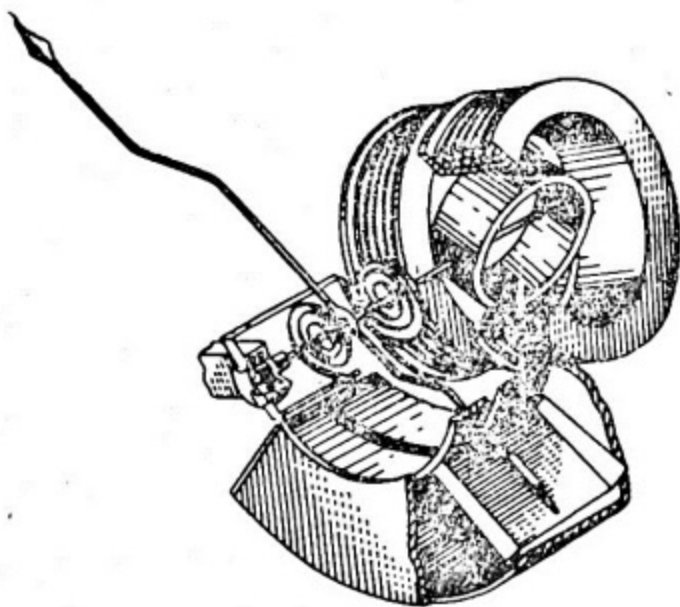


Рис. 2.3

применением стали в измерительном механизме. Приборы без стали носят название электродинамических, приборы со сталью — ферродинамических. Принцип действия этих при-

боров одинаков, но ферродинамические приборы более чувствительны, так как у них увеличен вращающий момент подвижной системы.

Электродинамические измерительные приборы предназначены для измерения главным образом мощности в цепях переменного и постоянного токов. Собственное потребление энергии приборами электродинамической системы несколько больше, чем приборами электромагнитной системы. Из всех приборов, пригодных для измерения в цепях переменного тока, электродинамические приборы являются самыми точными. Класс точности их достигает 0,1 и 0,2.

К недостаткам приборов этой системы следует отнести сильное влияние на показание приборов внешних полей и небольшую устойчивость к перегрузкам.

Приборы электростатической системы

Приборы электростатической системы основаны на взаимодействии электрически заряженных металлических тел. Эти приборы по принципу своего действия являются вольтметрами и применяются только в качестве вольтметров.

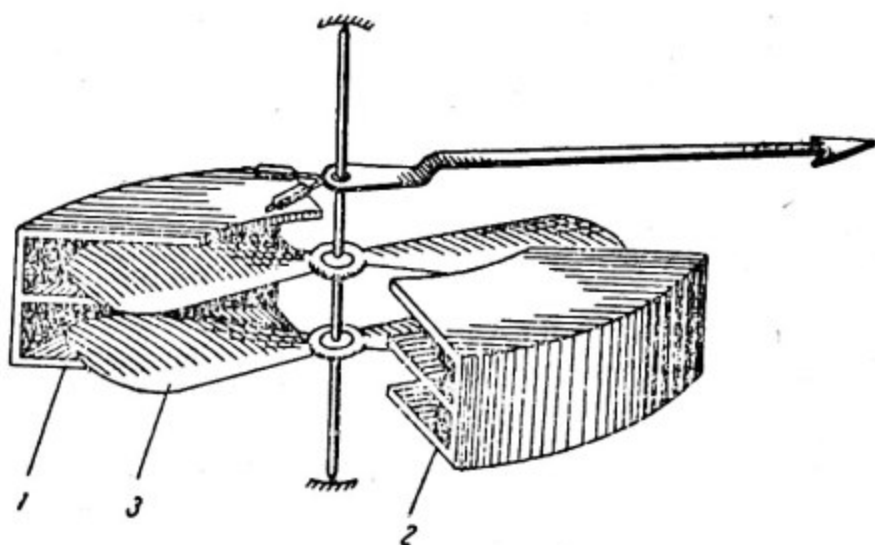


Рис. 2.4

На рис. 2.4 схематически показано устройство прибора электростатической системы. Измеряемое напряжение подводится одним полюсом к неподвижным электродам 1, 2, а другим полюсом к подвижным электродам 3. Подвижные электроды, заряженные противоположно относительно неподвижных, втягиваются внутрь камеры. Точность электростатических вольтметров невелика. Класс точности не выше 1,5. Шкала вначале неравномерная, в остальной части шкалу можно сделать почти равномерной.

Преимуществом вольтметров этого типа является отсутствие потребления энергии при постоянном токе и очень малое потребление энергии при переменном токе. На показания электростатических вольтметров почти не влияет ни температура окружающей среды, ни внешние магнитные поля, ни частота измеряемого напряжения. Влияние внешних электростатических полей весьма существенно.

Приборы выпрямительной (детекторной) системы

Приборы выпрямительной системы представляют собой сочетание измерительного прибора магнитоэлектрической системы и одного или нескольких полупроводниковых выпрямителей.

На рис. 2.5 показана одна из возможных схем соединения выпрямителей с измерительным прибором (схема однополупериодного выпрямления). Через выпрямитель B_1 , вклю-

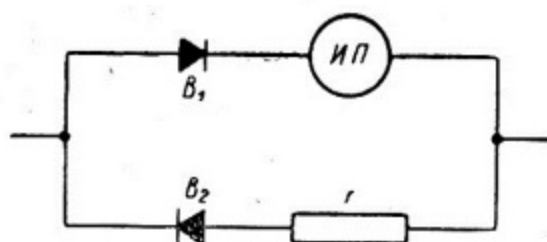


Рис. 2.5

ченный последовательно с измерительным прибором (ИП), ток проходит в течение одной половины периода. Чтобы не нарушать режим работы всей цепи (особенно при измерении тока), выпрямитель шунтируют другим выпрямителем B_2 , через который ток проходит в течение второй половины периода.

Из-за непостоянства параметров полупроводниковых выпрямителей точность приборов выпрямительной системы обычно не выше классов 1,5—2,5. Собственное потребление мощности незначительно. Шкала прибора в начальной части неравномерная, а в остальной части практически равномерная.

Приборы этой системы применяются для измерения малых переменных токов и напряжений при промышленной и повышенной частоте (до 10^4 гц).

Приборы термоэлектрической системы

Термоэлектрические приборы представляют собой сочетание измерительного прибора магнитоэлектрической системы с одним или несколькими термопреобразователями.

Схематическое устройство термоэлектрического прибора показано на рис. 2.6. Измеряемый ток I , протекая через нить AB термопреобразователя, нагревает спай C термопары, благодаря чему возникает термоэлектродвижущая сила, которая в свою очередь создает постоянный ток I_1 в цепи измерительного прибора ИП, соединенного с термопарой.

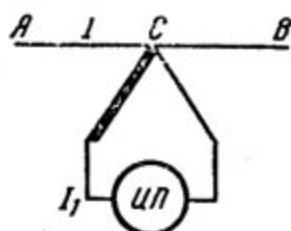


Рис. 2.6

Приборы этой системы используются для измерения переменного тока высокой частоты. Класс точности приборов до 1,0.

К числу недостатков следует отнести значительное потребление энергии, малую устойчивость к перегрузкам. Шкала неравномерная.

Задание

1. Ознакомление с электроизмерительными приборами

Порядок выполнения работы

Изучить электроизмерительные приборы, находящиеся на рабочем месте.

Условные обозначения, наносимые на измерительные приборы, даны в приложении III. Заполнить табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ п. п.	Наименование прибора	Фабричный номер	Система	Класс точности	Пределы измерений	Цена делений	Чувствительность

2. Ознакомление с источниками тока

В лабораторной практике встречаются следующие источники тока:

1. Сеть переменного тока промышленной частоты (50 гц).
2. Гальванические элементы.
3. Аккумуляторы.

Для преобразования переменного тока в постоянный используются выпрямители (кенотронные, газотронные, ртутные и полупроводниковые).

Источники тока характеризуются номинальным напряжением, номинальным током, внутренним сопротивлением и другими данными.

Источники тока могут соединяться в батареи. Если сопротивление внешней нагрузки велико (по сравнению с внутренним сопротивлением источника), то для увеличения тока в цепи выгодно последовательное соединение источников тока; если сопротивление нагрузки мало, выгодно параллельное соединение.

Перед включением источников тока необходимо определить тип источника, его напряжение и номинальный ток. Эти данные в большинстве случаев имеются на самих источниках.

Пример. На аккумуляторной батарее написано 2НКН-24. Это означает, что в батарее два элемента, назначение ее — питание цепей накала электронных ламп, материал электродов — кадмиево-никелевый, емкость — 24 ампер · час.

Порядок выполнения работы

Измерить напряжение источника тока, имеющегося на рабочем месте. Заполнить табл. 2.2.

Таблица 2.2

№ измерений	Наименование источника	Тип	Число аккумуляторных банок	Емкость, а·ч	Напряжение одного аккумулятора	Напряжение батареи

3. Ознакомление с потенциметрической схемой включения реостата

Реостат включается в цепь последовательно или потенциметрически. Схема потенциметрического включения реостата показана на рис. 2.7. При таком включении можно плавно регулировать напряжение от 0 до U_m , определяемого э. д. с. источника тока, к которому присоединяется ре-

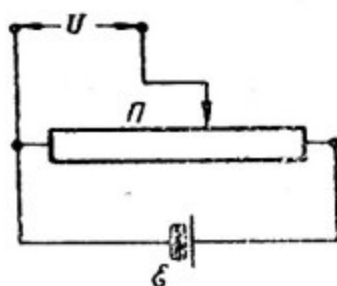


Рис. 2.7

остат. Напряжение снимается со скользящего контакта и одного из зажимов, к которым присоединяется источник тока. Реостат, включенный по схеме, данной на рис. 2.7, обычно называют потенциометром или регулируемым делителем напряжения.

Найдем зависимость напряжения U , снимаемого с потенциометра от длины x введенной его части. Для этого применим правила Кирхгофа к схеме, показанной на рис. 2.8.

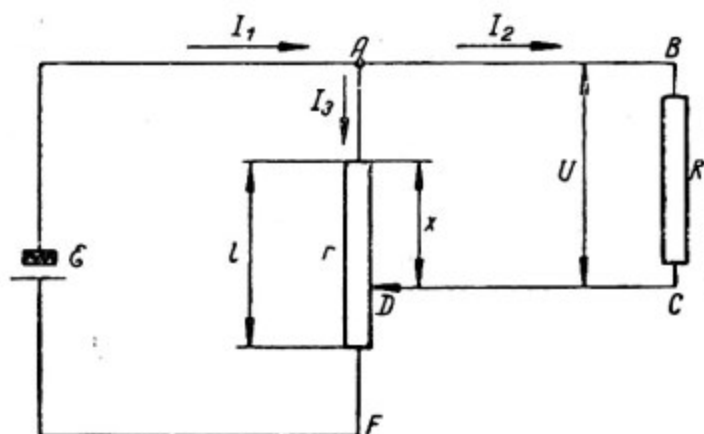


Рис. 2.8

На схеме введены обозначения: \mathcal{E} — э. д. с. источника; r — полное сопротивление потенциометра; x — длина введенной части потенциометра; R — сопротивление внешней цепи (нагрузки).

Применяя первое правило Кирхгофа для узла A, получаем

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (2.1)$$

Второе правило Кирхгофа для контуров $\mathcal{E}ADF$ и $ABCD$ дает:

$$I_1 \frac{r}{l} (l-x) + I_3 \frac{r}{l} x = \mathcal{E}; \quad (2.2)$$

$$I_2 R - I_3 \frac{r}{l} x = 0, \quad (2.3)$$

где $\frac{r}{l}$ — сопротивление единицы длины потенциометра;
 x — длина введенной части потенциометра.

При составлении уравнения (2.2) внутренним сопротивлением источника э. д. с. пренебрегаем.

Решив систему уравнений (2.1) (2.2), (2.3), найдем

$$I_2 = \frac{l \mathcal{E} x}{R l^2 + r l x - r x^2}.$$

Напряжение, снимаемое с потенциометра, равно

$$U = I_2 R = \frac{\mathcal{E} R l x}{R l^2 + r l x - r x^2}. \quad (2.4)$$

Для случая, когда $R \gg r$, получим

$$U = \frac{\frac{\mathcal{E} R l x}{R}}{\frac{R l^2}{R} + \left(\frac{r l x}{R} - \frac{r x^2}{R} \right)} \approx \frac{\mathcal{E} l x}{l^2 + 0} = \frac{\mathcal{E} x}{l}. \quad (2.5)$$

Следовательно, если сопротивление внешней цепи много больше общего сопротивления потенциометра, то U линейно зависит от введенной части потенциометра.

В данном задании исследуется зависимость напряжения U , снимаемого с потенциометра, от длины x введенной части потенциометра при различных сопротивлениях нагрузки.

Порядок выполнения работы

- 1. Собрать схему, данную на рис. 2.9. На схеме: \mathcal{E} — батарея аккумуляторов; Π — потенциометр; V — вольтметр; R — сопротивление; K — ключ.

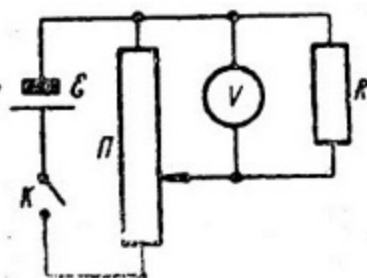


Рис. 2.9

2. Измерить напряжение U при различных значениях x и при данном нагрузочном сопротивлении $R = R_1$, получить десять — пятнадцать экспериментальных точек. Результаты измерений записать в таблицу.

3. Подобные измерения повторить при другом нагрузочном сопротивлении $R = R_2$. Нагрузочные сопротивления подобрать такие, чтобы удовлетворялись условия $R_1 \gg r$ и $R_2 < r$ (где r — полное сопротивление потенциометра).

Сопротивления измерить с помощью ампервольтметра, правила работы с которым даны в приложении II.

4. Начертить кривые $U = f(x)$ для двух значений R . Обе кривые построить на одном графике.

4. Шунтирование и градуирование амперметра

Шунтом называется сопротивление, подключенное параллельно входным зажимам амперметра (рис. 2.10). При шунтировании только часть подлежащего измерению тока отводится в прибор и непосредственно измеряется. Амперметр шунтируют в тех случаях, когда необходимо измерить ток, превышающий предел измерения амперметра.

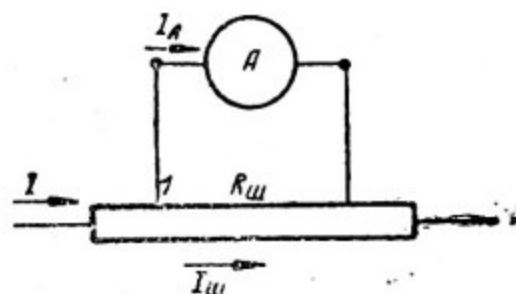


Рис. 2.10

Предположим, что необходимо измерить ток I , в n раз больший, чем максимальный допустимый ток через прибор. Для расчета сопротивления шунта $R_{ш}$ применим правила Кирхгофа к контуру, изображенному на рис. 2.10. Обозначим ток, протекающий через шунт, $I_{ш}$; внутреннее сопротивление амперметра — R_A . Первое правило Кирхгофа для узла I дает:

$$I = I_A + I_{ш}. \quad (2.6)$$

Применив второе правило Кирхгофа, получим

$$I_A R_A - I_{ш} R_{ш} = 0. \quad (2.7)$$

Мы предполагали, что

$$I = n I_A. \quad (2.8)$$

Из уравнений (2.6), (2.7), (2.8) найдем

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n-1}. \quad (2.9)$$

Следовательно, для расширения области применения амперметра в n раз необходимо, чтобы сопротивление шунта было в $n-1$ раз меньше сопротивления прибора.

Длину шунта, изготовляемого из провода, рассчитывают по формуле

$$l = \frac{R_{\text{ш}} S}{\rho}, \quad (2.10)$$

где S — площадь сечения провода; ρ — удельное сопротивление провода.

Данное задание включает расчет шунта и градуирование зашунтированного амперметра.

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать сопротивление шунта. Максимальная величина измеряемого тока I задается преподавателем. Внутреннее сопротивление R_A рассчитывается по данным на шкале прибора (предельной величине тока и предельной величине напряжения).

2. Изготовить шунт из медной проволоки. Диаметр проволоки измерить микрометром, удельное сопротивление найти

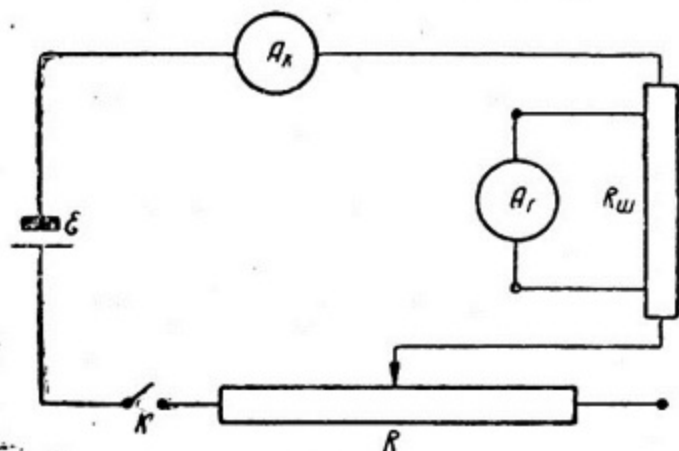


Рис. 2.11

по таблицам. Шунт изготовить в виде катушки на картонном каркасе и подключить к зажимам градуируемого прибора.

3. Собрать схему, данную на рис. 2.11. На схеме: \mathcal{E} — источник тока; A_x — контрольный амперметр; A_r — градуируемый амперметр; $R_{\text{ш}}$ — шунт; R — реостат; K — ключ.

4. После проверки собранной схемы замкнуть цепь и проверить правильность подбора шунта. Если шунт подобран

правильно, то при отклонении стрелки шунтируемого прибора до конца шкалы контрольный амперметр должен показать значение заданного тока. В случае, когда такого совпадения нет, необходимо изменить длину шунта. После экспериментальной подгонки длины шунта проградуировать прибор по показаниям контрольного амперметра.

Записать показания контрольного и градуируемого приборов в таблицу.

5. По полученным данным построить график зависимости показаний контрольного прибора в амперах от показаний градуируемого прибора в делениях шкалы.

5. Градуирование вольтметра

В качестве вольтметра может быть использован любой электроизмерительный прибор, проградуированный в единицах напряжения. Вольтметр включается параллельно участку цепи, на концах которого измеряется разность потенциалов. Поэтому его сопротивление должно быть много больше

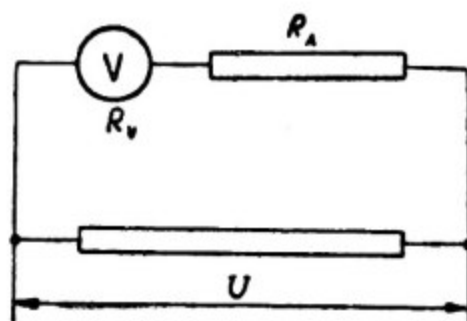


Рис. 2.12

сопротивления цепи, на котором измеряется падение напряжения, иначе при подключении прибора произойдет изменение тока и перераспределение потенциалов в цепи.

Если внутреннее сопротивление прибора, используемого как вольтметр, недостаточно, то последовательно с прибором включается соответствующее добавочное сопротивление R_d (рис. 2.12). Добавочное сопротивление R_d включается также в случае, когда необходимо расширить пределы измерения прибора. Величина R_d в последнем случае рассчитывается из условия, что ток в цепи, состоящей из последовательно соединенных градуируемого прибора и дополнительного сопротивления R_d , должен быть не больше максимального тока I_m , на который рассчитан прибор. Следовательно, если известны величина измеряемого напряжения U и внутреннее

сопротивление прибора R_V , то, применив закон Ома к участку цепи (см. рис. 2.12), получим

$$U = I_{\text{макс}}(R_V + R_d),$$

откуда

$$R_d = \frac{U}{I_{\text{макс}}} - R_V. \quad (2.11)$$

Данное задание включает расчеты добавочного сопротивления и градуирование вольтметра.

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать добавочное сопротивление. Максимальная величина измеряемого напряжения задается преподавателем. Все остальные данные определяются по шкале градуируемого прибора.

2. Собрать схему, приведенную на рис. 2.13. На схеме: \mathcal{E} — батарея аккумуляторов; K — ключ; Π — потенциометр;

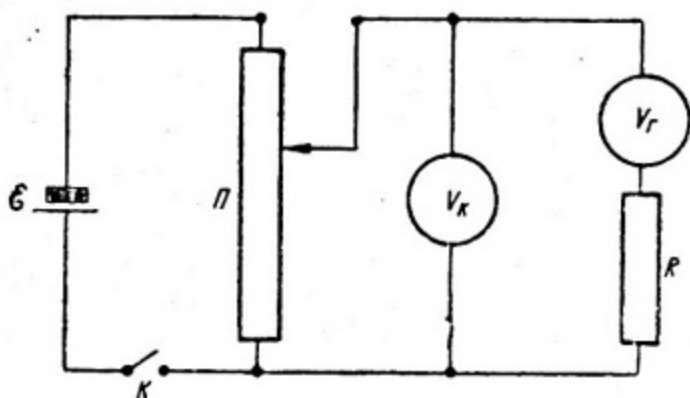


Рис. 2.13

V_k — контрольный вольтметр; R — магазин сопротивлений, играющий роль добавочного сопротивления; V_r — градуируемый прибор.

3. После проверки собранной схемы замкнуть цепь и проверить правильность подбора добавочного сопротивления. Для этого набирают на магазине сопротивление, равное полученному из расчета R_d , и, передвигая движок потенциометра, увеличивают напряжение, подаваемое на вольтметры, пока стрелка на градуируемом вольтметре не достигнет максимального значения.

Если добавочное сопротивление R_d подобрано правильно, то при максимальном отклонении стрелки градуируемого прибора, контрольный вольтметр должен показывать заданное напряжение. Если такого согласования показаний вольтмет-

ров нет, необходимо подобрать сопротивление магазина так, чтобы требуемое условие соблюдалось. В этом случае набранное на магазине сопротивление действительно равно необходимому R_d .

Сравнить полученное экспериментальным путем значение R_d с ранее вычисленным.

4. Проградуировать прибор по показаниям контрольного вольтметра. Записать показания градуируемого и контрольного приборов в таблицу.

5. По полученным данным построить график зависимости показаний контрольного прибора в вольтах от показаний градуируемого прибора в делениях шкалы.

Работа 3

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА МОСТЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ВВЕДЕНИЕ

Для измерения сопротивлений обычно применяют один из следующих методов:

1. Определение сопротивлений по результатам непосредственного измерения тока и напряжения (метод амперметра и вольтметра).

2. Прямое или косвенное сравнение измеряемого сопротивления с образцовым.

3. Зарядка или разрядка конденсатора известной емкости через измеряемое сопротивление. О величине сопротивления судят по скорости зарядки или разрядки конденсатора.

Наибольшее распространение имеют методы сравнения измеряемого сопротивления с образцовым. При сравнении измеряемое и образцовое сопротивления соединяют последовательно или параллельно или включают их в более сложные — чаще всего мостовые схемы.

Рассмотрим схему простейшего (четырёхплечевого) моста. Схема такого моста представляет собой не что иное, как два делителя напряжения, соединенные параллельно. Делитель

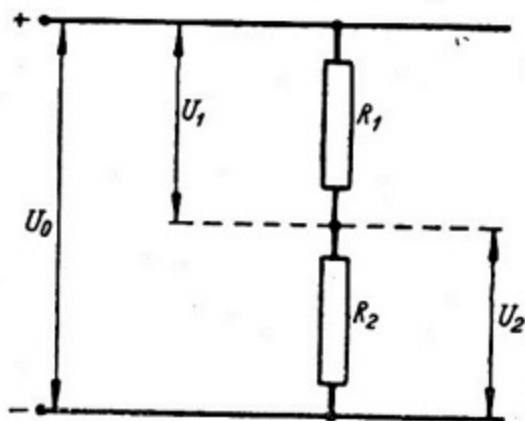


Рис. 3.1

напряжения в простейшем варианте состоит из двух сопротивлений, соединенных последовательно и подсоединенных к источнику напряжения (рис. 3.1). Ток, идущий по участку цепи R_1R_2 , равен $I = \frac{U_0}{R_1 + R_2}$. Падение напряжения на R_1 равно $U_1 = IR_1$; падение напряжения на R_2 равно $U_2 = IR_2$. Следовательно,

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (3.1)$$

Из формулы (3.1) следует, что отношение падений напряжения на составляющих делитель сопротивлений зависит лишь от отношения величин самих сопротивлений.

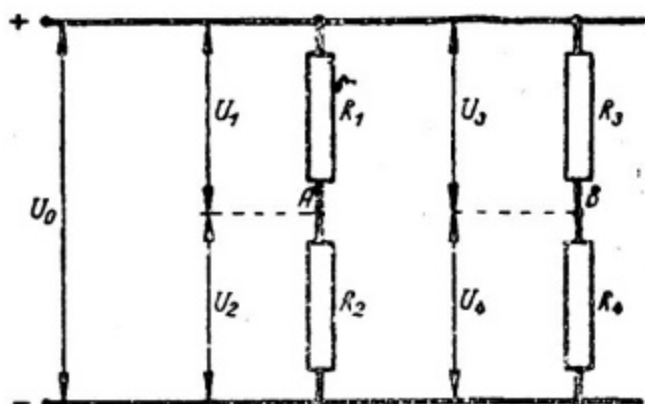


Рис. 3.2

Подключим к источнику тока параллельно два делителя (рис. 3.2). Если величины сопротивлений таковы, что

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \quad (3.2)$$

то в этом случае

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{U_3}{U_4}. \quad (3.3)$$

Следовательно, при условии (3.2) оба делителя делят одну и ту же величину U_0 в одном и том же отношении, поэтому потенциалы точек A и B будут одинаковыми. Если между точками A и B включить гальванометр, то он покажет отсутствие тока.

Схема измерительного моста получается из схемы, указанной на рис. 3.2, следующим образом. Вместо R_4 включают неизвестное сопротивление R_x , вместо R_3 — эталонное сопротивление R_s (рис. 3.3). В качестве второго делителя используют сопротивление R со скользящим контактом. Перемещением скользящего контакта A можно изменять величину

ны R_1 и R_2 . Между точками A и B включен гальванометр. При некотором положении движка A гальванометр показывает нуль тока (так называемая «нулевая точка»). Из равенств (3.2) и (3.3) следует, что в этом случае

$$\frac{R_x}{R_3} = \frac{R_2}{R_1},$$

или

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1}. \quad (3.4)$$

Определим наиболее выгодное положение скользящего контакта, при котором погрешность измерений оказывается

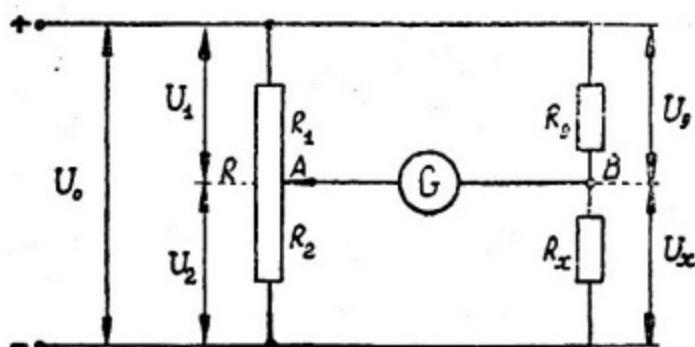


Рис. 3.3

наименьшей. Учитывая, что $R = R_1 + R_2$, можно соотношение (3.4) представить в виде

$$R_x = R_3 \frac{R - R_1}{R_1}.$$

Продифференцировав это выражение по R_1 , получим, что частная абсолютная погрешность ∂R_x равна:

$$\partial R_x = \pm dR_1 \frac{\partial R_x}{\partial R_1} = \pm dR_1 \frac{R R_3}{R_1^2}.$$

Относительная погрешность измерения

$$E = \pm \frac{\partial R_x}{R_x} = \pm \frac{R}{(R - R_1) R_1} dR_1.$$

Погрешность E минимальна при наименьшем значении множителя, стоящего при dR_1 . Легко показать, что функция

$$f(R_1) = \frac{R}{(R - R_1) R_1},$$

где $R = \text{const}$, имеет минимум при $R_1 = \frac{R}{2}$. Следовательно,

наименьшая погрешность получается при условии $R_1 = R_2$, т. е. когда скользящий контакт находится посередине. Согласно формуле (3.4) для этого необходимо, чтобы эта-

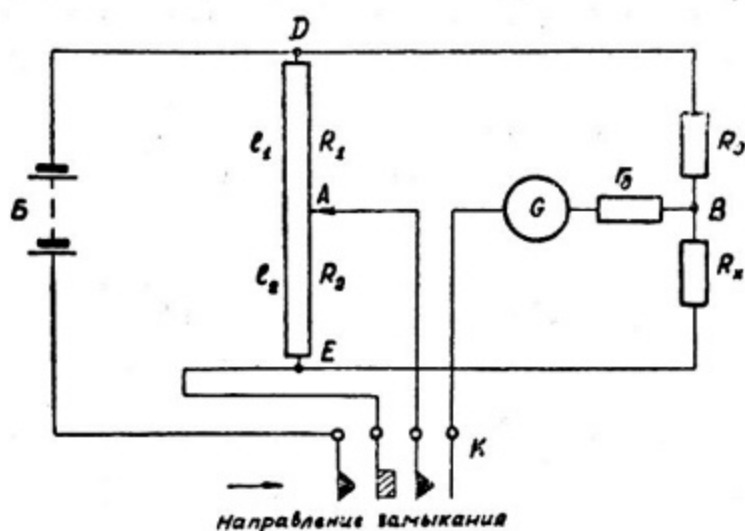


Рис. 3.4

лон R_3 и измеряемое сопротивление R_x были приблизительно равны по величине.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) реохорд, 2) магазин сопротивлений, 3) двойной ключ, 4) гальванометр, 5) аккумуляторная батарея, 6) мост МО-47, 7) нагреватель, 8) термометр, 9) неизвестные сопротивления.

Рабочая схема моста лабораторного типа представлена на рис. 3.4. В качестве переменного сопротивления применен реохорд DE — однородная тонкая проволока, натянутая на деревянную линейку, имеющую миллиметровую шкалу. Длина проволоки 1 м. Вдоль проволоки можно перемещать контактный движок A . К концевым клеммам реохорда D и E присоединяются источник питания (последовательно с одной половиной ключа K) и сопротивления R_3 и R_x (R_3 — магазин эталонных сопротивлений, R_x — неизвестное сопротивление). Гальванометр включается между точкой A и точкой B через вторую половину ключа K . Из схемы видно, что при нажатии на ключ K замыкается сначала цепь источника питания, а затем цепь гальванометра. В схеме используется гальванометр магнитоэлектрической системы с ценой деления порядка 10^{-6} а/дел. Нуль шкалы расположен посередине. Гальванометр снабжен арретирующим приспособлением и регулировочным устройством для установки стрелки на нуль

шкалы в отсутствие тока («коррекция нуля»). Последовательно с гальванометром включено дополнительное сопротивление r_0 порядка 10^4 ом для того, чтобы предохранить гальванометр от перегрузки во время пробных измерений.

В некоторых схемах подобного типа для повышения точности измерений можно менять местами два плеча моста, например, R_x и R_3 . Измерения проводятся при обоих положениях плеч. Сечение проволоки реохорда постоянно, и, следовательно, сопротивления отрезков DA и AE пропорциональны длинам отрезков l_1 и l_2 , т. е.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}. \quad (3.5)$$

При установке движка реохорда в положение, соответствующее равновесию в схеме («нулевая» точка), гальванометр не дает отклонения. Если движок несколько переместить, то гальванометр обнаруживает появление тока, который изменяет направление при перемещении движка сначала в одну, а затем в другую сторону от нулевой точки. Этим приемом убеждаются в правильном определении нулевой точки. Из формул (3.4) и (3.5) следует, что неизвестное сопротивление R_x вычисляется по формуле

$$R_x = R_3 \frac{l_2}{l_1}, \quad (3.6)$$

где l_1 и l_2 длины плеч реохорда, отвечающие тому положению движка реохорда, при котором гальванометр показывает нуль тока. Следовательно, измерение сопротивлений сводится к измерению длин.

При работе с мостом необходимо соблюдать следующие условия:

1. Сначала замкнуть цепь питания моста, а затем цепь гальванометра. В схеме на рис. 3.4 для этой цели служит двойной ключ K . Это требование обусловлено тем, что три известных сопротивления моста обычно безындуктивные, а R_x может быть любым, в том числе таким, которое обладает большой индуктивностью. В этом случае при замыкании и размыкании цепи появляется э. д. с. самоиндукции, которая вызывает экстратоки замыкания и размыкания. Выполняя условие 1, мы исключаем воздействие этих токов на гальванометр.

2. Свести к минимальному время нахождения моста под током во избежание перегрева сопротивлений. Поэтому нажим на ключ K должен быть кратковременным.

3. При пробном подборе баланса моста шунтировать гальванометр или вводить последовательно с ним ограничивающее сопротивление r_0 . При приближении к точному балансу

для увеличения чувствительности схемы сопротивление r_0 выключать.

4. Для достижения максимальной точности измерений важно следить за чистотой контактов соединительных проводов и надежностью контакта движка с реохордом.

5. Не следует на применяемом в данной работе мосте измерять сопротивления менее одного ома, так как при этом начинает сказываться сопротивление соединительных проводов.

6. Наиболее точные измерения получаются при положении нулевой точки посередине реохорда. Поэтому после пробных измерений следует стремиться устанавливать величину R_0 примерно равной предполагаемой величине R_x .

Кроме моста с реохордом в данной работе используется мост МО-47 фабричного изготовления.

Мост МО-47 применяется для определения зависимости сопротивления металлов от температуры. Эта зависимость приближенно описывается для металлов формулой

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где R_0 — сопротивление при 0°C ; α — температурный коэффициент сопротивления, который можно определить, если известен график $R = R(t)$.

На рис. 3.5 дана схема установки для измерения температурного коэффициента металлов. Исследуемое сопротивление представляет собой отрезок проволоки, намотанной на

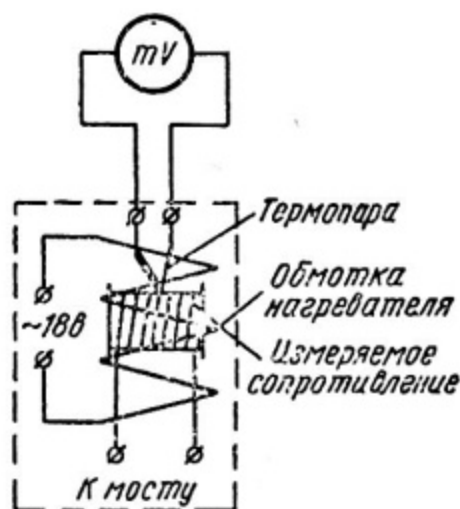


Рис. 3.5

каркасе в виде катушки. Катушка помещена в нагреватель, в качестве которого используется электрическая печь. Температура нагревателя регулируется реостатом R . Сопротивление измеряется мостом. Температура определяется с помощью

термопары, присоединенной к милливольтметру (см. работу 7). Цена деления милливольтметра дана в град/дел.

При выполнении этой части работы следует перед включением нагревателя измерить сопротивление при комнатной температуре. При дальнейших измерениях рекомендуется сначала выполнять измерения на мосте (как процесс более длительный), а затем, возможно быстрее, фиксировать показания термопары. Если производить указанные операции в обратном порядке, то неизбежно произойдет изменение температуры за то время, пока производятся измерения на мосте, что безусловно приведет к искажению результатов.

Задание

1. Измерение сопротивлений

1. Собрать схему согласно рис. 3.4.
2. Измерить неизвестные сопротивления. Стремиться подобрать R_3 таким, чтобы «нулевая» точка находилась примерно посередине реохорда. Измерения повторить несколько раз.
3. Измерить величину двух сопротивлений, соединенных последовательно. Полученный результат сравнить с результатом расчета по формуле

$$R = R_{x_1} + R_{x_2}$$

4. Измерить величину двух сопротивлений, соединенных параллельно. Полученный результат сравнить с результатом расчета по формуле

$$R = \frac{R_{x_1} \cdot R_{x_2}}{R_{x_1} + R_{x_2}}$$

Результаты измерений записать в табл. 3.1.

Таблица 3.1

№ измерений	№ сопротивлений	Сопротивление R_3	Длина плеча, l_1	Длина плеча, l_2	Отношение $\frac{l_2}{l_1}$	Искомое сопротивление $R_x = R_3 l_2 / l_1$	Среднее значение \bar{R}_x

2. Определение температурного коэффициента сопротивления

1. Собрать схему согласно рис. 3.5.
2. Измерить зависимость $R = R(t)$ в диапазоне температур 20—400° С.
3. Построить график $R = R(t)$ и по нему определить α .
4. Оценить доверительный интервал в определении α .

ПРИЛОЖЕНИЕ

МОСТ МО-47

(схема и правила работы с прибором)

Принципиальная схема моста МО-47 показана на рис. 3.6. На эбонитовой панели моста смонтированы:

а) пять декадных переключателей сопротивлений, включенных последовательно и образующих сопротивление, обозначенное на схеме R_0 . Величина его изменяется в пределах 0,1—10⁴ ом;

б) контактные пластины и 10 контактов; на контактах установлено два комплекта сопротивлений 1, 10, 100, 1000 и 10 000 ом, образующие штепсельные магазины сопротивлений А и В;

в) кнопки Б и Г для включения батареи питания и гальванометра;

г) зажимы х — для подключения измеряемого сопротивления;

д) зажимы г — для подключения гальванометра;

е) зажимы б — для подключения батареи питания схемы.

Катушки сопротивлений намотаны бифилярно из манганиновой проволоки на металлические лакированные каркасы.

Мост дает возможность измерять сопротивления от 20 до 10⁵ ом; погрешность моста не превышает 0,2%; допустимая мощность на одну катушку 0,5 вт. При измерениях сопротивлений менее 20 ом погрешность измерений возрастает.

Для того чтобы подготовить мост к работе и измерить сопротивление, нужно сделать следующее.

Присоединить к зажимам б источник питания. Присоединить к зажимам г гальванометр с последовательно включенным сопротивлением порядка 5·10⁴ ом. Присоединить к зажимам х измеряемое сопротивление. Установить штепсели в магазинах А и В согласно табл. 3.2. При указанных в табл. 3.2 соотношениях компенсация достигается при значе-

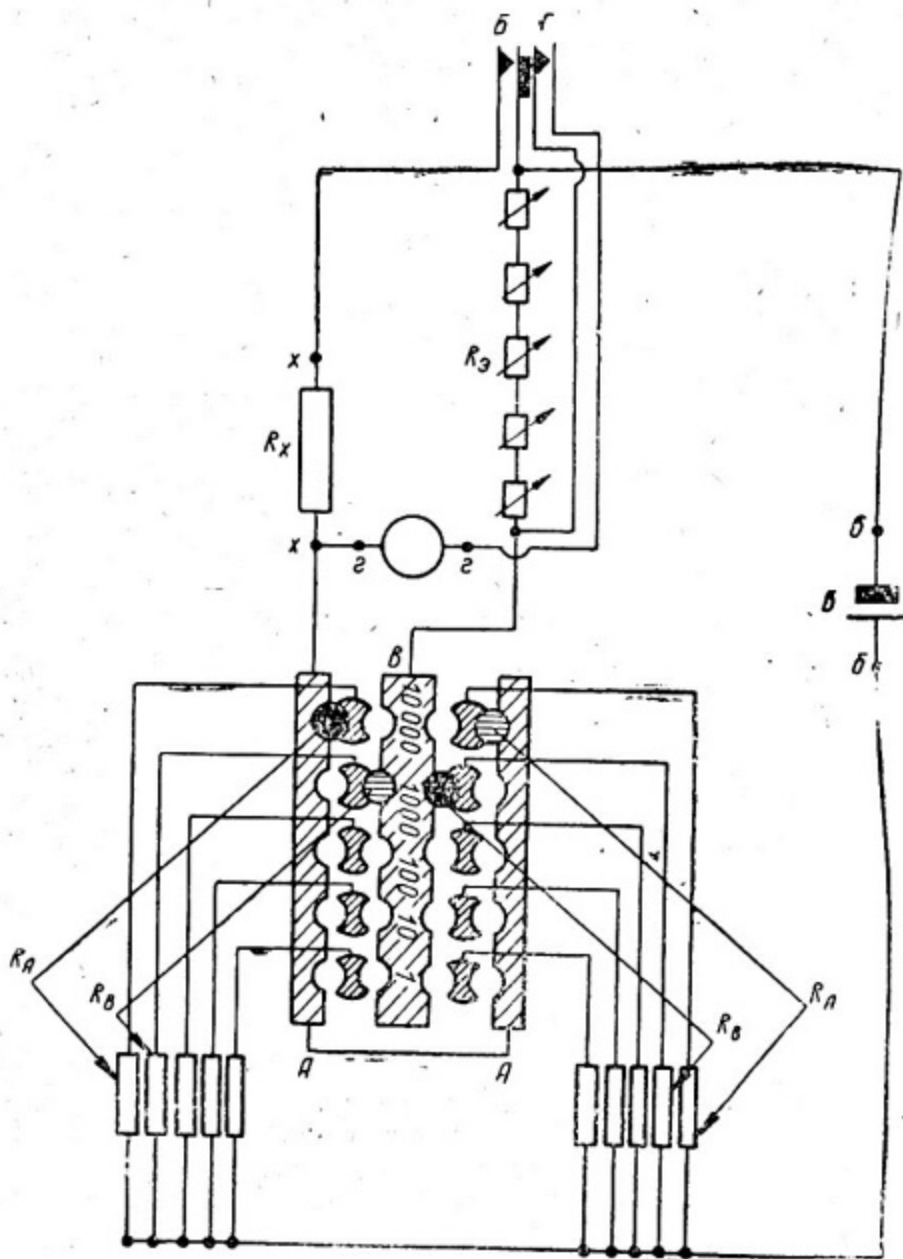


Рис. 3.6

ниях R_x , близких к предельному, чем обеспечивается максимальная точность измерений*.

Таблица 3.2

Измеряемое сопротивление, ом	Положение штепселей магазинов	
	R_A	R_B
Менее 10	1	1000
10 — 10 ²	10	1000
10 ² — 10 ³	100	1000
10 ³ — 10 ⁴	1000	1000
10 ⁴ — 10 ⁵	10000	1000
Более 10 ⁵	10000	100

Установить величину сопротивления, примерно равную измеряемой (с учетом уже установленного отношения $\frac{R_A}{R_B}$).

Нажать кнопку Б, а затем кратковременно кнопку Г. Судя по отклонению стрелки гальванометра, подобрать окончательно величину R_x так, чтобы отсутствовал ток через гальванометр. Рассчитать неизвестное сопротивление по формуле

$$R_x = \frac{R_A}{R_B} R_0.$$

Пример. На рис. 3.6 показаны штепсели (зачерненные), установленные так, что $R_A = 10\,000$ ом и $R_B = 1000$ ом, т. е. мост готов для измерения сопротивлений 10^4 — 10^5 ом. Возможен другой вариант установки штепселей (заштрихованные штепсели вместо зачерненных), который позволяет сохранить те же значения R_A и R_B , но теперь R_A установлено уже в правом комплекте сопротивлений, а R_B — в левом. Стрелками указано соответствие между штепселями и сопротивлениями. Рекомендуется при измерениях использовать оба варианта установки штепселей и брать среднее из двух результатов. Пусть при указанном отношении R_A и R_B требуется измерить сопротивление, величина которого предполагается около $40\,000$ ом. Поскольку в момент отсутствия

* Отметим, что полученное выше условие минимальной погрешности для моста со скользящим контактом в данном случае не применимо, так как приведенный выше расчет основывался на том, что $R_1 + R_2 = \text{const}$, что в случае моста МО-47 не выполняется.

тока через гальванометр должно выполняться равенство $\frac{R_A}{R_B} = \frac{R_x}{R_9}$, в котором $\frac{R_A}{R_B} = 10$, то нужно подобрать такое R_9 , чтобы $\frac{R_x}{R_9} \approx 10$, следовательно, необходимо установить $R_9 \approx 4000$ ом.

Работа 4

ИЗУЧЕНИЕ ЗЕРКАЛЬНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

ВВЕДЕНИЕ

Гальванометром называется электроизмерительный прибор с непосредственным отсчетом, имеющий высокую чувствительность. Характерной особенностью гальванометров, отличающей их от других приборов для измерения тока, является наличие неградуированной шкалы. Шкала градуируется самим наблюдателем. Гальванометры используются для измерения малых токов, напряжений и количества электричества. Применяются гальванометры также в качестве нулевых приборов, т. е. приборов, предназначенных для указания отсутствия тока при измерении в мостовых и потенциометрических схемах. Чувствительность гальванометров может быть очень высока: современные гальванометры могут измерять токи до 10^{-11} а.

При точных измерениях постоянного тока обычно используются зеркальные гальванометры магнитоэлектрической системы с подвижной катушкой. Принцип их действия такой же, как и амперметров магнитоэлектрической системы.

На рис. 4.1а схематически показано устройство такого гальванометра. В магнитном поле постоянного магнита NS помещен железный цилиндр B . Цилиндр охватывает подвижная катушка K , состоящая из легкой рамки, на которой находится обмотка из тонкой изолированной проволоки. Цилиндр B укрепляется неподвижно, а катушка, подвешенная на металлической или кварцевой нити A , может свободно вращаться вокруг цилиндра.

Измерение тока основано на измерении углов поворота катушки при протекании по ее обмотке измеряемого тока. Для отсчета углов поворота на нити укреплено небольшое зеркало R , на которое падает световой луч от осветительного устройства. Отраженный зеркалом световой луч падает на шкалу. При повороте зеркала луч света («зайчик»)

перемещается по шкале и дает возможность точно отмечать очень малые углы поворота.

Различают два способа отсчета углов: объективный и субъективный. При объективном способе отсчета определяют положение светового «зайчика» непосредственно на шкале. При субъективном способе рассматривают в зрительную трубу изображение освещенной шкалы в зеркале гальванометра. Субъективный способ более точен.

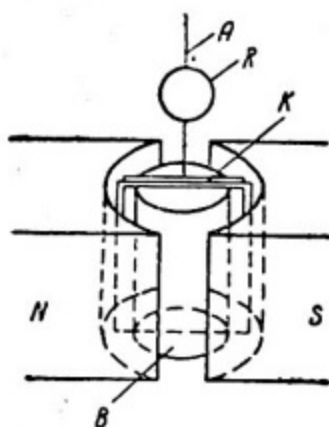


Рис. 4-1а

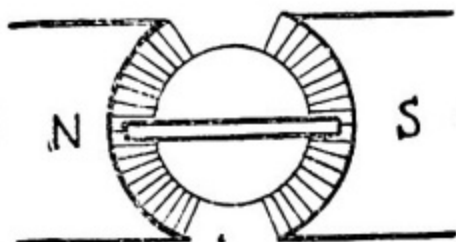


Рис. 4-1б

Рассмотрим в элементарной форме теорию движения подвижной части гальванометра. При протекании тока через катушку на нее действует момент сил

$$M = [P_m B],$$

где B — вектор магнитной индукции в воздушном зазоре магнита; P_m — магнитный момент катушки с током, численно равный $n\sigma I$ (σ — площадь витка, n — число витков катушки, I — ток).

Направление силовых линий в пространстве между полюсами магнита и железным цилиндром можно считать радиальным (рис. 4.1б), поэтому плоскости витков катушки при ее вращении остаются параллельными силовым линиям поля. Следовательно, при вращении катушки момент M остается постоянным и равным:

$$M = Bn\sigma I.$$

Согласно основному закону динамики вращательного движения уравнение движения катушки:

$$J\ddot{\alpha} = M - M_1 - M_2, \quad (4.1)$$

где J — момент инерции катушки;

$M = Bn\sigma I$ — момент сил, действующий на катушку со стороны магнитного поля;

$M_1 = D\alpha$ — момент кручения нити подвеса; D — удельный момент кручения;

M_2 — момент сил торможения, который вызывается сопротивлением воздуха, а также индукционными токами в рамке и обмотке катушки, возникающими при ее вращении в магнитном поле. Наибольшее действие на движение катушки оказывают индукционные токи в ее обмотке, поэтому сопротивлением воздуха и индукционными токами в рамке можно пренебречь.

Величину M_2 можно определить из следующих рассуждений. При повороте катушки в каждом вертикальном прово-

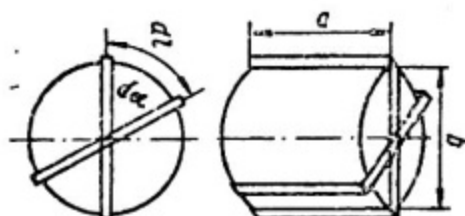


Рис. 4.2

де витка индуцируется э. д. с. $\mathcal{E} = Bav$ (a — длина провода, v — его линейная скорость). Из рис. 4.2 следует, что $v = \frac{dl}{dt} = \frac{b}{2} \cdot \frac{d\alpha}{dt}$. В одном витке обмотки возникает э. д. с.

$$2\mathcal{E} = Bab \frac{d\alpha}{dt} = B\sigma\dot{\alpha}.$$

В обмотке катушки с n витками при ее вращении индуцируется э. д. с.

$$\mathcal{E}_i = Bn\sigma\dot{\alpha}.$$

Если цепь гальванометра замкнута, то в обмотке возникает ток I_i , величину которого можно определить по закону Ома:

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R + R_r} = \frac{Bn\sigma}{R + R_r} \dot{\alpha},$$

где R — внешнее сопротивление цепи гальванометра (индуктивным сопротивлением обмотки пренебрегаем).

Следовательно, момент сил, действующих в магнитном поле на катушку с током I_i и тормозящих ее движение, равен:

$$M_2 = Bn\sigma I_i = \frac{B^2 n^2 \sigma^2}{R + R_r} \dot{\alpha} = P\dot{\alpha},$$

где

$$P = \frac{B^2 n^2 \sigma^2}{R + R_r}. \quad (4.2)$$

Подставив значения моментов в уравнение (4.1), получим

$$J\ddot{\alpha} = Bn\tau I - D\alpha - P\dot{\alpha}. \quad (4.3)$$

Это уравнение можно записать в следующем виде:

$$\ddot{\alpha} + 2\beta\dot{\alpha} + \omega_0^2\alpha = \frac{Bn\tau I}{J}, \quad (4.4)$$

где

$$\beta = \frac{P}{2J}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{D}{J}}. \quad (4.5)$$

Из теории колебаний известно, что уравнение (4.4) описывает свободные затухающие колебания системы*. Из соотношений (4.2) и (4.5) следует, что коэффициент торможения P и, следовательно, коэффициент затухания β зависят от сопротивления внешней цепи.

В зависимости от начальных условий гальванометр работает в стационарном (токовом) или баллистическом режимах. В случае стационарного режима через гальванометр пропускается постоянный ток и отклонение подвижной части гальванометра пропорционально этому току. В случае баллистического режима на гальванометр подается кратковременный импульс тока. Максимальное отклонение подвижной части гальванометра в этом случае пропорционально количеству электричества, протекшего через гальванометр. (Баллистический режим подробно рассмотрен в работе 5.)

В случае стационарного режима гальванометра движение его подвижной части при включении и выключении тока описывается уравнением, которое является решением уравнения (4.4) при начальных условиях: $\dot{\alpha} = 0$ при $t = 0$. Характер движения существенно зависит от соотношения между коэффициентом затухания β и собственной частотой колебаний системы ω_0 . Возможны три случая:

$$I. \beta^2 < \omega_0^2, \text{ т. е. } \frac{P^2}{4J^2} < \frac{D}{J}.$$

В этом случае подвижная часть гальванометра совершает затухающие колебания около положения равновесия с частотой

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$$

* Подстановкой $\alpha_1 = \alpha - \frac{Bn\tau I}{J\omega_0^2}$ уравнение (4.4) можно привести к уравнению вида: $\ddot{\alpha}_1 + 2\beta\dot{\alpha}_1 + \omega_0^2\alpha_1 = 0$.

и периодом

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{J} - \frac{P^2}{4J^2}}}$$

На рис. 4.3 и 4.4 показан процесс движения подвижной части гальванометра при включении тока (кривая 1) и при выключении тока (кривая 1').

Угол α_m , на который поворачивается подвижная часть гальванометра под действием тока I , определяется из усло-

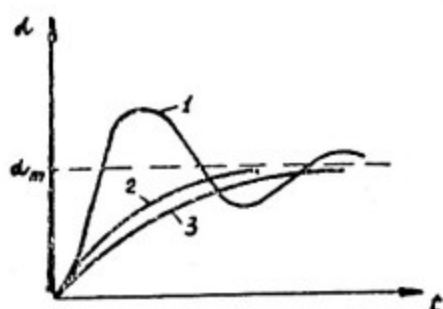


Рис. 4.3

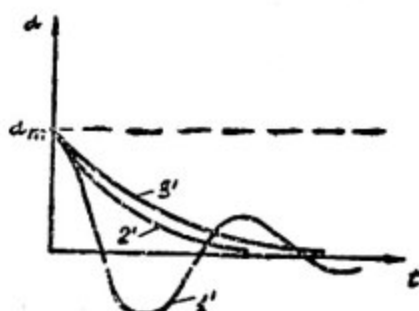


Рис. 4.4

вия, что при установившемся положении момент сил действующих на катушку гальванометра со стороны магнитного поля уравнивается моментом кручения нити подвеса [уравнение (4.3) при условии $\ddot{\alpha} = \dot{\alpha} = 0$]. Следовательно,

$$Bn\sigma I = D\alpha_m,$$

откуда

$$\alpha_m = \frac{Bn\sigma I}{D}. \quad (4.6)$$

Затухание колебаний характеризуют логарифмическим декрементом затухания, который равен натуральному логарифму отношения амплитуд, соответствующих моментам времени, отличающимся на период

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

Период колебаний подвижной части гальванометра в режиме свободного движения при разомкнутой цепи гальванометра называют периодом свободных колебаний.

$$\text{II. } \beta^2 = \omega_0^2, \text{ т. е. } \frac{P^2}{4J^2} = \frac{D}{J}.$$

В этом случае $T = \infty$ и движение имеет аperiодический характер. Гальванометр, работающий в таком режиме, называют критически успокоенным. На рис. 4.3 и 4.4 показаны кривые движения подвижной части гальванометра, работающего в этом режиме. Кривая 2 соответствует движению при включении тока, кривая 2' — при выключении тока. (При данных начальных условиях система в случае аperiодического движения не переходит через положение равновесия.)

Достигнуть критического режима работы гальванометра можно путем уменьшения внешнего сопротивления цепи гальванометра R до значения R_k , которое может быть определено из равенства

$$R_r + R_k = \frac{B^2 c^2 n^2}{2 \sqrt{JD}}$$

(так как по определению $P = \frac{B^2 c^2 n^2}{R_r + R_k}$ и вместе с тем для данного случая $P = 2 \sqrt{JD}$). Величина $R_r + R_k$ называется полным критическим сопротивлением, а R_k — внешним критическим сопротивлением.

$$\text{III. } \omega_0^2 < \beta^2, \text{ т. е. } \frac{D}{J} < \frac{P^2}{4J^2}.$$

Движение катушки также аperiодическое, но с меньшей скоростью. Чем больше P , т. е. чем меньше внешнее сопротивление R , тем медленнее устанавливается равновесие (кривые 3 и 3' на рис. 4.3 и 4.4). Гальванометр, работающий в таком режиме, называется переуспокоенным.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы. Характер движения подвижной части гальванометра может в зависимости от сопротивления внешней цепи гальванометра меняться в широких пределах от периодического с малым затуханием до аperiодического. Наиболее выгодным для измерений является режим работы гальванометра, близкий к критическому. В этом случае время успокоения гальванометра минимально.

Одной из важнейших характеристик гальванометра является его чувствительность по току S_I , которая определяется углом поворота его подвижной части при токе, равном единице. Следовательно, на основании формулы (4.6) чувствительность S_I равна:

$$S_I = \frac{\alpha_m}{I} = \frac{Bnc}{D}. \quad (4.7)$$

Чувствительность гальванометра по напряжению определяется аналогичным образом:

$$S_V = \frac{a_m}{U_r} = \frac{Bnc}{DR_r}, \quad (4.8)$$

где $U_r = IR_r$ — напряжение на зажимах гальванометра; R_r — сопротивление гальванометра.

Из формул (4.7) и (4.8) следует, что чувствительность гальванометра зависит от конструктивных особенностей прибора.

При работе с гальванометром необходимо знать следующие его характеристики:

- 1) чувствительность по току S_I ;
- 2) период свободных колебаний T_0 ;
- 3) внутреннее сопротивление гальванометра R_r ;
- 4) критическое сопротивление R_k ;

Эти данные обычно указываются в паспорте прибора.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) зеркальный гальванометр с осветителем и шкалой, 2) магазин сопротивлений, 3) постоянное сопротивление 1—2 ом, 4) миллиамперметр, 5) три ключа, 6) переключатель направления тока, 7) аккумулятор, 8) потенциометр.

Для изучения работы зеркального гальванометра и определения его характеристик собирается схема, показанная на

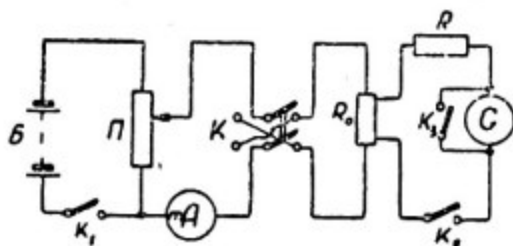


Рис. 4.5

рис. 4.5. На схеме: Б — аккумулятор, П — потенциометр для регулировки напряжения, подаваемого в схему, А — миллиамперметр, К — переключатель направления тока, R_0 — постоянное сопротивление 1—2 ом, R — магазин сопротивлений (1—100 000 ом), G — зеркальный гальванометр, K_1 — ключ для включения источника тока, K_2 — ключ для размыкания цепи гальванометра, K_3 — тормозной ключ.

При включении ключа K_3 гальванометр замыкается «накоротко» и в катушке гальванометра индуцируется ток, который вызывает большое торможение. Замыкание производят

в момент, когда катушка начинает возвращаться к положению равновесия. Как только ключ будет замкнут, катушка остановится. Для того чтобы она возвратилась в нулевое положение, повторяют замыкание и размыкание ключа несколько раз.

Перед началом работы гальванометр должен быть правильно установлен, что достигается вращением трех установочных винтов, на которые опирается корпус прибора. Это значит, что подвижная система гальванометра, удерживаемая в фиксированном положении до начала работы специальным приспособлением (арретиром), должна после освобождения арретира свободно двигаться между полюсами, не касаясь их при вращении. Освобождение подвижной системы, а также установка гальванометра должны производиться очень осторожно во избежание обрыва нити подвеса. Эта настройка производится лаборантом до начала работы.

Измерение угла поворота подвижной части гальванометра производится объективным методом. Осветитель располагают так, чтобы луч от него был направлен на зеркало

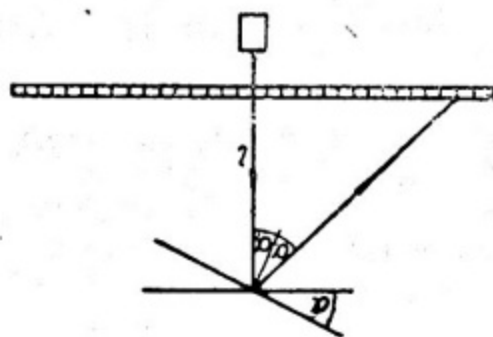


Рис. 4.6

гальванометра и отраженный луч попадал на середину шкалы (нуль отсчета). Подвижная часть при этом должна быть освобождена.

При повороте зеркала на угол α световой указатель перемещается по шкале на n миллиметров. Легко показать, что α и n связаны соотношением (рис. 4.6)

$$n = l \operatorname{tg} 2\alpha,$$

где l — расстояние от зеркала гальванометра до шкалы. При малых углах отсчета

$$\alpha = \frac{n}{2l},$$

следовательно, отсчет ведется по числу делений шкалы, отвечающему перемещению светового указателя.

После того как гальванометр приведен в рабочее состояние, проверяют работу схемы. Для этого при отключенном питании схемы набирают на магазине R сопротивление порядка 10^4 ом. Установив потенциометр Π на минимум, замыкают ключи K_1 и K_2 . Затем постепенно выводят потенциометр так, чтобы отклонение светового указателя достигло 150—200 делений. Размыкают ключ K_2 и наблюдают за характером движения светового указателя («зайчика»). При различном положении коммутатора колебательное движение указателя должно быть плавным и симметричным относительно нуля шкалы. В противном случае нужно вновь проверить установку гальванометра по уровню и установку шкалы и осветительного устройства.

На практике чувствительность зеркального гальванометра по току S_I определяется отклонением светового указателя в миллиметрах при токе в 1 а и при расстоянии между шкалой и зеркалом гальванометра 1 м, т. е.

$$S_I = \frac{n}{I_A l}.$$

Ток в цепи гальванометра, как видно из схемы (см. рис. 4.5), равен

$$I_r = \frac{I_A R_0}{R_r + R}.$$

Следовательно,

$$S_I = \frac{R_r + R}{R_0} \cdot \frac{n}{I_A l} \text{ мм/а} \cdot \text{м}.$$

Обычно в паспорте гальванометра указывается постоянная гальванометра по току, т. е. величина обратная чувствительности.

Задание

1. Определение внешнего критического сопротивления гальванометра

При отключенном источнике тока установить сопротивление R порядка 10^4 ом. Включить питание схемы и установить ток, при котором световой указатель отклонится к концу шкалы (на 150—200 мм от нулевого положения). Разомкнуть ключ K_1 и наблюдать за характером колебательного движения светового указателя. Тормозным ключом K_3 привести световой указатель в нулевое положение. Наблюдения повторить, последовательно уменьшая сопротивление R до тех пор, пока движение светового указателя не станет апериодическим. Это сопротивление R и будет критическим.

2. Определение чувствительности гальванометра по току

При сопротивлении R , равном или близком к критическому, получить отклонение «зайчика» по шкале на 150—200 мм. С помощью переключателя K изменить направление тока и определить отклонение «зайчика» в обе стороны от нулевого положения. Полученные результаты записать в табл. 4.1.

Измерения повторить при пяти различных значениях R . Вычислить среднее значение чувствительности S_I ср.

Таблица 4.1

№ измерения	I_A , ма	R , ом	n_1 , мм	n_2 , мм	$n_{ср}$, мм	S_I	S_I ср	ΔS

3. Определение периода свободных колебаний подвижной части гальванометра

Получить отклонение «зайчика» к концу шкалы и разомкнуть цепь гальванометра ключом K_2 . С помощью секундомера определить время 10—15 полных колебаний. Измерения повторить несколько раз. Вычислить среднее значение периода свободных колебаний.

4. Определение зависимости декремента затухания колебаний подвижной части гальванометра от величины внешнего сопротивления

Включить сопротивление R и получить отклонение «зайчика» по шкале на 150—200 мм. Отключить источник тока и, наблюдая за колебаниями «зайчика», записать величины амплитуд через период. Измерения провести для шести различных R , начиная с $R > R_k$ до R_{\max} (предельного сопротивления магазина).

Вычислить логарифмические декременты λ и построить график $\lambda = \lambda(R)$.

Примечание. Если при установлении требуемого отклонения светового указателя ток I_A оказывается больше предельного для миллиамперметра, включенного в схему, то необходимо миллиамперметр отключить.

5. Определение времени успокоения подвижной части гальванометра

Установить наибольшее отклонение светового указателя, отключить источник тока и одновременно включить секундомер. Измерить время, за которое световой указатель остановится в нулевом положении (с точностью до 1 мм). Время успокоения гальванометра определить при внешнем сопротивлении R , меньшем, равном и большем критического. Начать измерения при сопротивлении $R < R_k$. Затем измерения провести для пяти значений R , последовательно его увеличивая. Все значения R брать вблизи критического. Построить график $t = t(R)$.

Работа 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

ВВЕДЕНИЕ

Заряд конденсатора q связан с напряжением U между его обкладками соотношением

$$q = CU, \quad (5.1)$$

где C — емкость конденсатора.

Если измерить заряд конденсатора при известном напряжении, то по формуле (5.1) можно определить емкость конденсатора.

Заряд конденсатора измеряют при помощи зеркального гальванометра, работающего в баллистическом режиме. Теория и конструкция зеркального гальванометра изложена в работе 4. При пропускании через гальванометр кратковременного импульса тока его подвижная часть получит толчок, выйдет из положения равновесия и затем будет совершать затухающие колебания около положения равновесия. Если длительность импульса была мала по сравнению с периодом колебаний подвижной части гальванометра, то протекание тока через гальванометр закончится раньше, чем его подвижная система успеет отклониться от положения равновесия на заметный угол. При этом максимальный угол отклонения будет пропорционален импульсу тока, т. е. количеству электричества, протекающего через гальванометр. Следовательно, гальванометр может быть использован для измерения количества электричества, протекающего в цепи за короткий промежуток времени t , если период гальванометра T достаточно велик, т. е. выполняется условие $t \ll T$. Период колебаний гальванометра делают большим (10—30 сек) за счет увеличения момента инерции подвижной системы. Такой гальванометр называется баллистическим.

Движение подвижной части баллистического гальванометра после прохождения импульса тока описывается урав-

нением, которое является решением уравнения (4.4) при условии $I=0$ (отсутствуют внешние источники постоянного тока) и при начальных условиях: $\alpha=0$ и $\dot{\alpha} \neq 0$ при $t=0$. Характер движения существенным образом зависит от соотношения между β и ω_0 и показан на рис. 5.1. Кривая 1 соответствует условию $\beta^2 < \omega_0^2$, кривые 2 и 3 — условиям $\beta^2 = \omega_0^2$ и $\beta^2 > \omega_0^2$ соответственно.

Найдем соотношение между количеством электричества q , проходящим через баллистический гальванометр, и первым

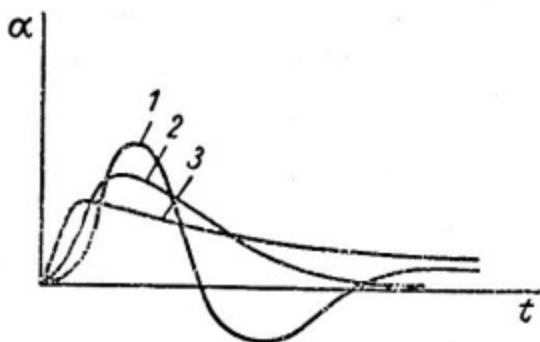


Рис. 5.1

максимальным отклонением гальванометра α_0 . Количество электричества q можно определить по формуле

$$q = \int_0^t i dt,$$

где i — мгновенное значение тока, t — продолжительность импульса.

Рассмотрим наиболее простой случай, когда сопротивление внешней цепи очень велико (например, через катушку гальванометра разряжается конденсатор с хорошим диэлектриком). В этом случае коэффициент торможения $P=0$ [см. формулу (4.2)].

За время импульса t катушка не успевает заметно выйти из положения равновесия ($\alpha = 0$), поэтому уравнение движения подвижной системы гальванометра (4.3) может быть упрощено и записано в виде

$$J\ddot{\alpha} = Bn\sigma i, \quad (5.2)$$

где J — момент инерции подвижной системы; $Bn\sigma i$ — момент сил, вызывающих движение катушки (B — магнитная индукция; σ — площадь витка катушки; n — число витков катушки; i — сила тока).

Интегрируя уравнение (5.2), получаем

$$J\dot{\alpha}_t = Bn\sigma \int_0^t i dt = Bn\sigma q, \quad (5.3)$$

где $\dot{\alpha}_t$ — угловая скорость катушки в момент t ($\dot{\alpha}$ в начальный момент равно нулю).

Таким образом, под действием импульса момента силы

$\int_0^t M dt = Bn\sigma q$ катушка приобретает кинетическую энергию, равную

$$W_{\text{кин}} = \frac{1}{2} J (\dot{\alpha}_t)^2.$$

Эта энергия затрачивается на закручивание нити подвеса. Потенциальная энергия нити подвеса при повороте катушки на угол α_0 равна

$$W_{\text{пот}} = \frac{1}{2} D \alpha_0^2,$$

где D — удельный момент кручения нити подвеса. Согласно закону сохранения энергии можно написать

$$\frac{1}{2} D \alpha_0^2 = \frac{1}{2} J (\dot{\alpha}_t)^2,$$

или

$$J (\dot{\alpha}_t)^2 = D \alpha_0^2. \quad (5.4)$$

Возведя в квадрат уравнение (5.3) и разделив его на уравнение (5.4), получим

$$J = \frac{B^2 n^2 \sigma^2 q^2}{D \alpha_0^2}. \quad (5.5)$$

Период собственных колебаний подвижной части гальванометра ($P = 0$) равен

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D}}.$$

откуда

$$J = \frac{T_0^2 D}{4\pi^2}.$$

Подставляя значение J в уравнение (5.5), получаем

$$\frac{T_0^2 D}{4\pi^2} = \frac{B^2 n^2 \sigma^2 q^2}{D \alpha_0^2}.$$

Следовательно,

$$q = \frac{T_0}{2\pi} \cdot \frac{D}{Bn\sigma} \alpha_0,$$

или

$$q = S_q \alpha_0, \quad (5.6)$$

где S_q — баллистическая постоянная гальванометра, равная

$$S_q = \frac{T_0}{2\pi} \cdot \frac{D}{Bn\sigma} \quad (5.7)$$

Таким образом, максимальный угол отклонения α_0 подвижной системы баллистического гальванометра (первый баллистический отброс) согласно формуле (5.6) пропорционален количеству электричества q , протекшего через гальванометр.

Практически отклонение α_0 определяется по смещению светового указателя («зайчика») по шкале. Если световой указатель перемещается на n миллиметров, то

$$\alpha_0 = \frac{n}{2l},$$

где l — расстояние от зеркала гальванометра до шкалы.

Отсюда

$$q = \frac{S_q}{2l} n.$$

Для каждой установки величина l постоянна, поэтому, обозначив

$$K = \frac{S_q}{2l},$$

получим

$$q = Kn. \quad (5.8)$$

Баллистическая постоянная установки K имеет размерность кулон на деление шкалы ($\kappa/\text{мм}$).

Принципиальная схема установки для измерения емкости конденсатора показана на рис. 5.2. Конденсатор C заряжают

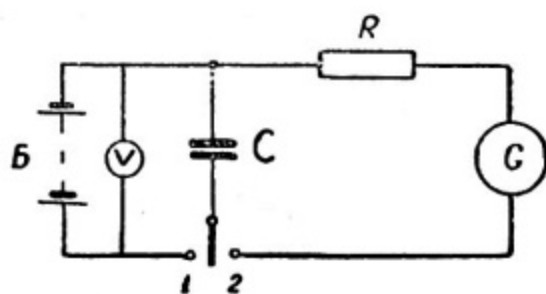


Рис. 5.2

от батареи B (ключ K в положении 1) и затем разряжают через гальванометр G (ключ K в положении 2). Измерив первый баллистический отброс гальванометра n , по формулам (5.8) и (5.1) определяют неизвестную емкость C .

Значение баллистической постоянной установки K можно определить, разряжая через баллистический гальванометр

конденсатор известной емкости C , заряженный до разности потенциалов U , следовательно, содержащий заряд $q = CU$.

При разряде конденсатора сила тока в цепи изменяется по закону

$$i = i_0 e^{-t/RC},$$

где $i_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}$ (\mathcal{E} — э. д. с. батареи B).

Величину $\tau = RC$ называют постоянной времени цепи. Чем больше τ , тем медленнее разряжается конденсатор. Гальванометр будет работать в баллистическом режиме только в случае, если конденсатор практически полностью разряжается за время, много меньшее периода гальванометра, т. е. при достаточно малой постоянной времени цепи τ .

Для определения предельного значения τ , при котором гальванометр еще работает в баллистическом режиме, исследуют зависимость первого отброса гальванометра n от величины RC -цепи (рис. 5.2). В области баллистического режима первый отброс гальванометра пропорционален заряду конденсатора и не зависит от параметров цепи.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) баллистический гальванометр, 2) магазин емкостей, 3) два измеряемых конденсатора, 4) аккумуляторная батарея, 5) потенциометр, 6) вольтметр, 7) магазин сопротивлений, 8) двойной пружинный ключ, 9) переключатель, 10) два ключа.

Для определения емкости конденсатора описанным методом собирают схему, показанную на рис. 5.3. Конденсатор заряжают от батареи B . Напряжение на конденсатор подает-

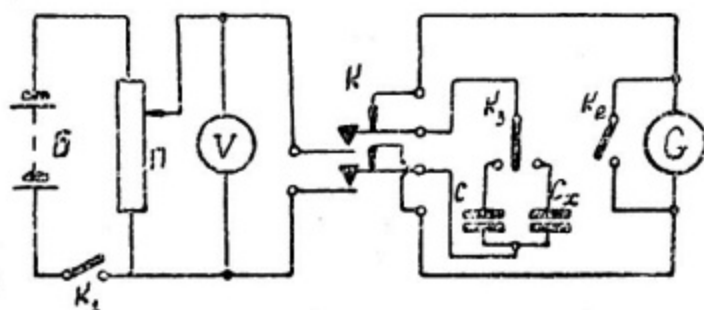


Рис. 5.3

ся от потенциометра Π через двойной ключ K . Как видно из схемы, пока двойной ключ не нажат, конденсатор соединен с гальванометром и отключен от батареи B . При нажатии двойного ключа конденсатор включается в цепь батареи и

одновременно отключается от гальванометра. Следовательно, при нажатии ключа K замыкается цепь зарядки конденсатора и конденсатор заряжается до заданного напряжения U . При возвращении ключа K в первоначальное положение конденсатор разряжается через баллистический гальванометр. С помощью переключателя K_3 в схему попеременно включаются конденсаторы с известной и неизвестной емкостью. Параллельно гальванометру присоединен тормозной ключ K_2 , служащий для быстрого успокоения подвижной части гальванометра (см. работу 4). Ключ K_2 следует замыкать на короткое время в тот момент, когда «зайчик» гальванометра проходит через положение равновесия. Настройка гальванометра производится так же, как в работе 4.

Задание

1. Определение области баллистического режима гальванометра

Собрать схему согласно рис. 5.3. В цепь гальванометра дополнительно включить сопротивление R . В качестве конденсатора известной емкости C использовать магазин емкостей. В случае необходимости при выполнении первого задания подключить параллельно два магазина емкостей. Подключение конденсатора к источнику питания производить кратковременным нажатием на двойной ключ. Для возвращения «зайчика» гальванометра на нуль включать тормозной ключ.

Задание заключается в том, что определяется первый отброс гальванометра n при различных значениях RC -цепи при условии, что заряд конденсатора во всех случаях остается одним и тем же. Выбор величины заряда производится следующим образом. Установить емкость C порядка $0,1 \text{ мкф}$ и подобрать такое напряжение U , при котором первое отклонение «зайчика» гальванометра будет на всю шкалу (примерно 200 мм). По формуле (5.1) вычислить заряд конденсатора и все остальные измерения производить при полученном значении q .

Измерить первый отброс гальванометра n при постоянном сопротивлении магазина R и при различных значениях C . При изменении C соответственно изменять U так, чтобы заряд конденсатора не изменился. Каждое измерение повторить несколько раз.

Емкость увеличивать до тех пор, пока первый отброс гальванометра не начнет уменьшаться. Рекомендуется провести исследование зависимости n от C при сопротивлении R порядка 10^7 ом , при сопротивлении, примерно в два раза меньшем, и при выключенном магазине сопротивлений. Все измерения записываются в таблицу. По полученным данным по-

строить кривые $n = f(C)$. Определить предельное значение постоянной времени установки τ , при которой данный гальванометр еще работает в баллистическом режиме.

2. Определение баллистической постоянной установки

Все последующие измерения производить при выключенном сопротивлении R . Подобрать известную емкость C и напряжение U так, чтобы «зайчик» гальванометра отклонился к концу шкалы. Определить первый отброс баллистического гальванометра n . Измерение повторить несколько раз и определить среднее значение n . Из формул (5.1) и (5.8) следует, что

$$K = \frac{CU}{n}.$$

По полученным данным вычислить среднее значение K .

3. Определение емкости конденсатора

Включить в схему конденсатор неизвестной емкости C_x . Установить напряжение U_x на конденсаторе, соответствующее максимальному отклонению «зайчика» по шкале гальванометра. Измерить первый отброс гальванометра n_x . Измерения повторить несколько раз и определить среднее значение n_x . Емкость C_x вычислить по формуле

$$C_x = \frac{Kn_x}{U_x}.$$

Определить емкость двух конденсаторов.

4. Измерение емкости параллельно и последовательно соединенных конденсаторов

Соединив два конденсатора один раз последовательно, другой раз параллельно, определить описанным методом их емкости и результаты сравнить с теоретическими.

Работа 6

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ И СОПРОТИВЛЕНИЙ КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее точным методом измерения электродвижущих сил является компенсационный метод. Электродвижущая сила (э. д. с.) источника тока равна напряжению на зажимах разомкнутого источника. Если для измерения э. д. с. к источнику тока подключается вольтметр, действие которого основано на протекании в нем тока, то измеряемое вольтметром напряжение равно

$$U_v = IR_v = \mathcal{E} - Ir,$$

где \mathcal{E} — э. д. с. источника тока; r — внутреннее сопротивление источника; R_v — сопротивление вольтметра; I — сила тока, текущего в цепи источник тока — вольтметр.

Следовательно, измеренное вольтметром напряжение меньше э. д. с. источника тока на величину падения напряжения внутри источника тока. Этот вывод не относится к результатам измерения электростатическим вольтметром, так как при его подключении ток I равен нулю. Электростатические вольтметры измеряют непосредственно э. д. с. источника тока, но эти вольтметры имеют сравнительно невысокую точность.

Компенсационный метод измерения напряжения состоит в том, что измеряемое напряжение уравнивается (компенсируется) известным напряжением. На рис. 6.1 показана принципиальная схема компенсационного метода. Вспомогательный источник тока \mathcal{E}_0 и неизвестное напряжение U_x включены одноименными полюсами навстречу друг другу. В цепи источника \mathcal{E}_0 течет постоянный ток, который создает падение напряжения на компенсационном сопротивлении R_0 . Устанавливается такое положение контакта B , при котором неизвестное напряжение компенсируется напряжением U_{AB} , и ток через гальванометр G не течет.

При компенсации

$$U_x = U_{AB} = IR_x, \quad (6.1)$$

где I — сила тока, текущего через компенсационное сопротивление R_0 ; R_x — сопротивление между точками AB при компенсации неизвестного напряжения.

В качестве неизвестного напряжения можно подключить исследуемый источник тока. В момент компенсации через измеряемый источник ток не течет, и измеряется напряжение на зажимах разомкнутого источника, т. е. его э. д. с.

Точность метода значительно повышается, если для определения компенсационного напряжения используется нормальный элемент, так как его э. д. с. постоянна и известна

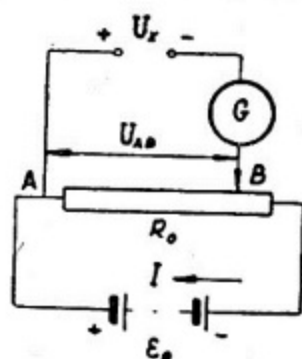


Рис. 6.1

с большой точностью (до пятого знака). Нормальный элемент включают вместо U_x и, изменяя положение контакта B , определяют момент компенсации (гальванометр показывает нуль тока). При этом

$$\mathcal{E}_N = IR_N, \quad (6.2)$$

где \mathcal{E}_N — э. д. с. нормального элемента; R_N — сопротивление участка AB при компенсации нормального элемента. Из соотношений (6.1) и (6.2) следует:

$$U_x = \mathcal{E}_N \frac{R_x}{R_N}. \quad (6.3)$$

Измерения компенсационным методом проводятся с очень большой точностью. Это объясняется, во-первых, тем, что гальванометр используется как нулевой прибор и градуировка его шкалы в расчеты не входит, а его чувствительность (особенно в случае применения зеркальных гальванометров) очень высока. Во-вторых, измерение неизвестного напряжения сводится к сравнению компенсационных сопротивлений, которые могут быть изготовлены и измерены с высокой точ-

ностью. Таким образом, компенсационный метод измерения дает возможность получить точность измерения, равную точности э. д. с. нормального элемента. Измерения могут быть проведены с точностью 0,01—0,02%.

Компенсационный метод может быть применен для измерения величин, связанных с напряжением определенной зависимостью, например, для измерения токов и сопротивлений.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) реохорд, 2) гальванометр, 3) батарея аккумуляторов, 4) нормальный элемент, 5) гальванический элемент, 6) щелочной аккумулятор, 7) коммутатор, 8) двойной ключ, 9) потенциометр типа ПП, 10) магазин сопротивлений, 11) измеряемое сопротивление, 12) реостат, 13) миллиамперметр.

Измерения э. д. с. проводятся по схеме, показанной на рис. 6.2. В качестве компенсационного сопротивления используется реохорд AD — однородная тонкая проволока, натяну-

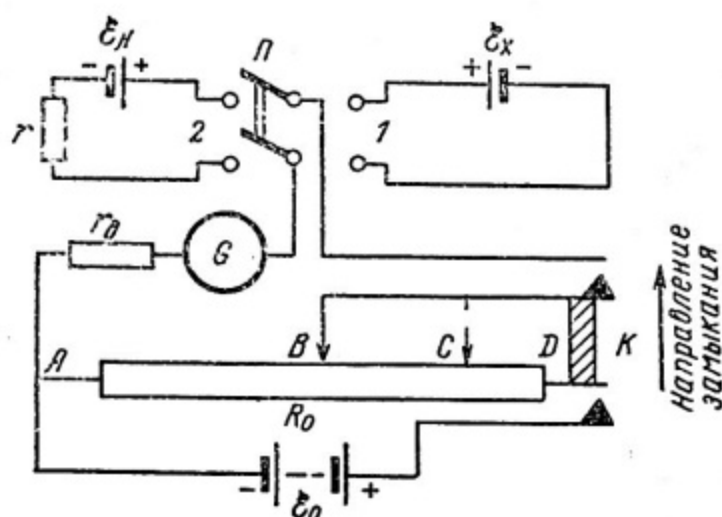


Рис. 6.2

тая на деревянную линейку, имеющую миллиметровую шкалу. Вдоль проволоки можно перемещать контактный движок B , что дает возможность плавно регулировать компенсирующее напряжение. Вспомогательный источник E_0 должен удовлетворять двум условиям. Во-первых, его э. д. с. должна быть больше э. д. с. нормального элемента и измеряемой э. д. с., так как только в том случае можно найти на реохорде точку, которая удовлетворяет условию компенсации. Во-вторых, во время измерений ток через реохорд должен оставаться постоянным, что возможно только в том случае, если батарея имеет достаточную емкость. В схеме

используется батарея аккумуляторов, э. д. с. которой равна 2—3 в.

При помощи переключателя П нормальный элемент \mathcal{E}_N и исследуемый источник тока \mathcal{E}_x поочередно включаются в цепь гальванометра G. При сборке схемы необходимо следить за тем, чтобы батарея \mathcal{E}_0 и источник тока \mathcal{E}_x (или \mathcal{E}_N) были включены одноименными полюсами навстречу друг другу. Через нормальный элемент \mathcal{E}_N нельзя пропускать ток, сила которого больше чем 10^{-5} а, поэтому последовательно с ним включается добавочное сопротивление r порядка 10^4 ом. Чувствительный гальванометр G имеет нуль посередине шкалы. Последовательно с гальванометром включено добавочное переменное сопротивление r_0 (магазин сопротивлений) порядка 10^3 — 10^4 ом, для того чтобы отброс гальванометра был не слишком велик пока не достигнута компенсация.

При нажатии двойного ключа K сначала замыкается цепь вспомогательной батареи \mathcal{E}_0 и затем цепь гальванометра. Такая последовательность замыкания цепей необходима потому, что в противном случае даже при правильном подборе положения движка реохорда стрелка гальванометра будет сильно отклоняться в момент включения источника \mathcal{E}_x (или \mathcal{E}_N) вследствие отсутствия в реохорде компенсирующего тока от батареи \mathcal{E}_0 . Замыкание цепей двойным ключом должно проводиться на очень короткое время, чтобы не разряжать источник тока.

Порядок проведения измерений следующий. Переключатель П ставят в положение 1. Перемещают движок реохорда и, замыкая на короткое время двойной ключ K, наблюдают за положением стрелки гальванометра. Определяют положение движка, при котором наступает компенсация (гальванометр показывает нуль тока). При приближении к моменту компенсации сопротивление r_0 уменьшают. Определение точной компенсации производят при выключенном сопротивлении r_0 , т. е. при наибольшей чувствительности измерительной схемы. Затем переключатель П ставят в положение 2 и производят компенсацию нормального элемента \mathcal{E}_N (в этом случае r_0 можно не включать).

Неизвестная э. д. с. вычисляется по формуле (6.3). Сопротивление проволоки реохорда можно считать пропорциональным длине реохорда, и расчетная формула (6.3) может быть приведена к виду

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_N \frac{l_{AB}}{l_{AC}}, \quad (6.4)$$

где l_{AB} — длина участка реохорда между точкой A и движком при компенсации измеряемой э. д. с.; l_{AC} — длина уча-

стка реохорда между точкой *A* и движком при компенсации нормального элемента. Точность измерений по схеме рис. 6.2 не велика, так как погрешность отсчета длины на реохорде не менее чем 0,5 мм. Кроме того, в процессе эксплуатации проволока стирается и ее сопротивление по длине становится неодинаковым. Для точных измерений методом компенсации применяются фабричные приборы, называемые потенциометрами.

Во второй части данной работы с помощью потенциометра типа ПП измеряется неизвестное сопротивление. Измере-

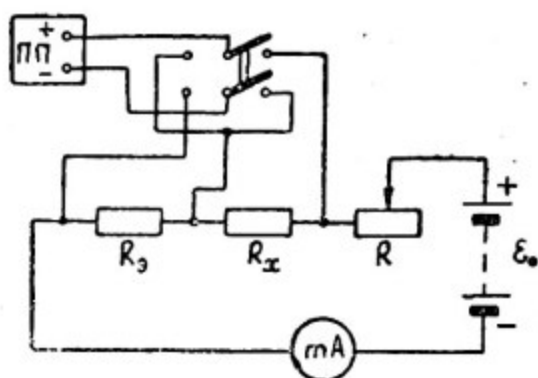


Рис. 6.3

ния проводятся по схеме, показанной на рис. 6.3. Измеряемое сопротивление R_x соединяется последовательно с эталонным сопротивлением R_3 (магазин сопротивлений). Сила тока, проходящего через сопротивления R_x и R_3 , определяется по миллиамперметру mA и может регулироваться с помощью реостата R . Во время измерения ток в цепи поддерживается постоянным. С помощью переключателя потенциометр ПП поочередно подключается к сопротивлениям R_x и R_3 и измеряется падение напряжения на обоих сопротивлениях. Показания потенциометра соответственно равны:

$$U_x = IR_x \text{ и } U_3 = IR_3,$$

откуда

$$R_x = \frac{U_x}{U_3} R_3. \quad (6.5)$$

Задание

1. Измерение э. д. с. источников тока

1. Собрать схему, приведенную на рис. 6.2.
2. Произвести измерения э. д. с. щелочного аккумулятора и гальванического элемента. Для каждого исследуемого источника тока измерения повторить несколько раз. Результаты измерений записать в таблицу.

3. Вычислить э. д. с. источников тока по формуле (6.4).

Примечание: э. д. с. нормального элемента $\mathcal{E}_N = 1,0183$ в.

2. Измерение сопротивлений

1. Собрать схему, данную на рис. 6.3.
2. Произвести настройку потенциометра, согласно инструкции (см. приложение к данной работе).
3. Измерить напряжения и занести результаты измерений в таблицу.
4. Вычислить величину сопротивления по формуле (6.5).

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПОТЕНЦИОМЕТР ПП

(Схема и правила работы с прибором)

Потенциометр постоянного тока типа ПП предназначен для непосредственных измерений компенсационным методом э. д. с. и напряжений в пределах от 0 до 71 мв.

На рис. 6.4 дана принципиальная схема потенциометра. Поставив переключатель П в положение К (контроль), регулируют реостатом ток в цепи вспомогательной батареи \mathcal{E}_0 и добиваются того, чтобы гальванометр показывал отсутствие

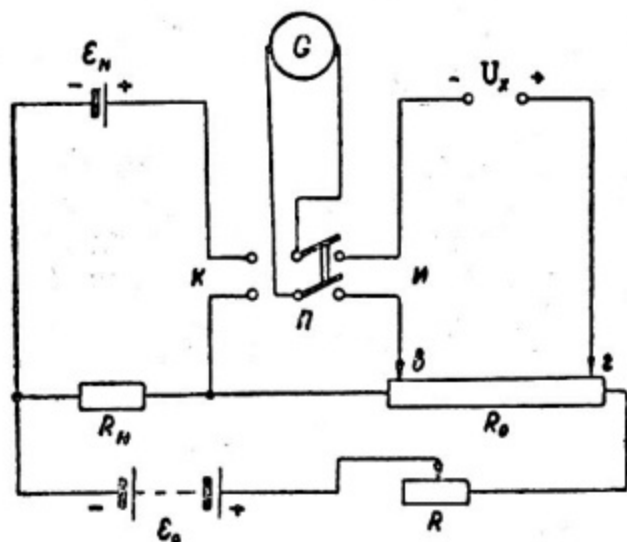


Рис. 6.4

тока. В этом случае падение напряжения на сопротивлении R_N точно равно э. д. с. нормального элемента и в цепи батареи устанавливается строго определенный рабочий ток. Тем самым создается известное с высокой точностью паде-

ние напряжения на компенсационном сопротивлении R_0 . Таким способом потенциометр калибруется по нормальному элементу.

Для измерения неизвестного напряжения переключатель П переводят в положение И (измерение). Изменяя положение контактов β , γ , добиваются отсутствия тока в гальванометре, при этом измеряемое напряжение компенсируется падением напряжения, созданным рабочим током на участке $\beta \gamma$ сопротивления R_0 .

На рис. 6.5 показана передняя панель прибора, на которой расположены шкала гальванометра и ручки управления. В потенциометре ПП компенсационное сопротивление можно изменять секционно переключателем P_c (грубая регулиров-

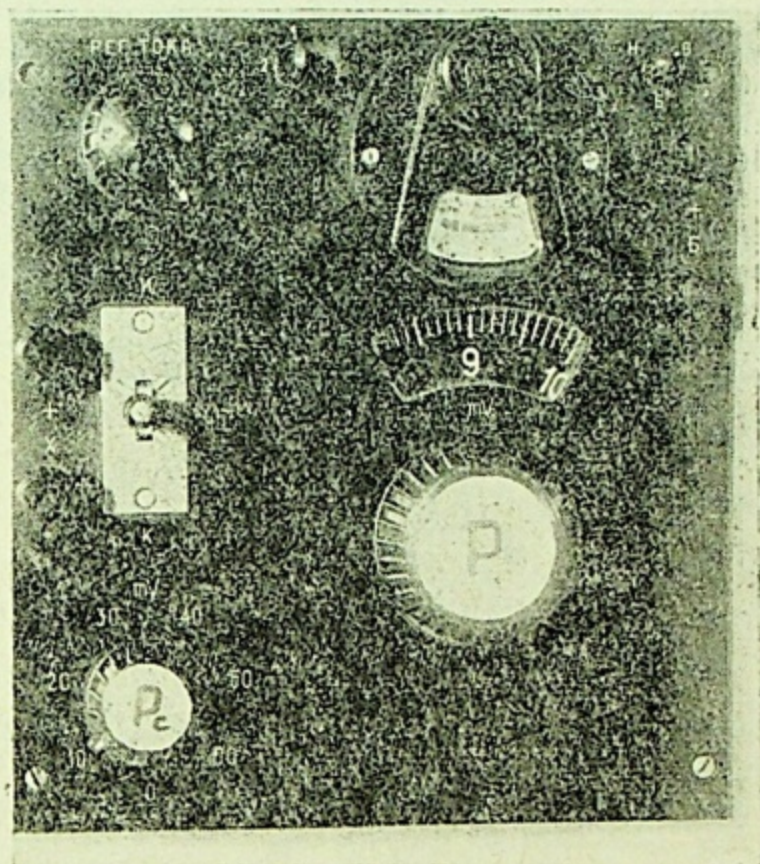


Рис. 6.5

ка) и реохордом Р (плавная регулировка), которые проградуированы непосредственно в милливольтках. Источник тока \mathcal{E}_0 может помещаться как внутри, так и вне потенциометра. При работе с внутренним источником тока переключатель Б ставится в положение В. Ручкой «Рег. тока» регулируют ток в цепи батарей \mathcal{E}_0 . При переключении расположенного ря-

дом переключателя регулировки тока (положения 1, 2 или 3) изменяется балластное сопротивление в этой цепи. Внешний источник тока подключается к зажимам Б, при этом переключатель Б ставится в положение Н.

Порядок выполнения работы:

1. Поворотом ручки «Корректор» установить стрелку гальванометра на 0.

2. Соблюдая полярность, присоединить к зажимам X измеряемый участок цепи.

3. Поставить переключатель П в положение К и переключатель регулировки тока в положение 1. Вращением ручки «Рег. тока» привести к нулю ток через гальванометр. Если гальванометр на нуль не устанавливается, поставить переключатель регулировки тока в положение 2 или 3 и снова провести регулировку тока. В случае, когда ток установить не удастся, необходимо подключить внешний источник тока.

4. Перевести переключатель П в положение И и вращением ручек секционного переключателя P_c и реохорда Р произвести компенсацию напряжений.

5. Измеряемое напряжение равно сумме показаний секционного переключателя и реохорда.

6. После окончания измерения перевести прибор в нерабочее состояние, для чего установить переключатель в среднее положение.

Работа 7

ГРАДУИРОВАНИЕ ТЕРМОПАРЫ

ВВЕДЕНИЕ

Измерение температуры с помощью термопар основано на явлении термоэлектричества. Это явление заключается в том, что в цепи, состоящей из двух или большего числа разнородных материалов, в том случае, когда температуры мест их

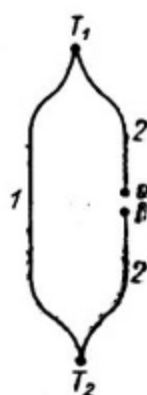


Рис. 7.1

соединений неодинаковы, возникает термоэлектродвижущая сила (т. э. д. с.), величина которой зависит от рода материалов, образующих цепь, а также от температур контактов этих материалов.

На рис. 7.1 представлена цепь, состоящая из двух разнородных материалов, контакты которых имеют различные температуры T_1 и T_2 . В этом случае в цепи возникает т. э. д. с. \mathcal{E} , величину которой можно определить, измерив разность потенциалов между точками a и b . Если температура точек a и b одинакова, то т. э. д. с. будет зависеть только от разности температур $T_2 - T_1$ и свойств материалов.

Соединение разных металлов или полупроводников (спай или какой-нибудь другой способ соединения) называется термопарой, или термоэлементом.

Опыт показывает, что термоэлектродвижущая сила зависит от разности температур нелинейно. Поэтому для характеристики термоэлектрических свойств термопары пользуются дифференциальной т. э. д. с.

$$\alpha = \frac{d\mathcal{E}}{dT} . \quad (7.1)$$

Для металлов дифференциальная т. э. д. с. имеет величину порядка десятков микровольт на градус (*мкв/град*) и, как правило, очень слабо зависит от температуры; у полупроводников она в 10—100 раз больше и сильно зависит от температуры вплоть до перемены знака.

В табл. 7.1 приведены данные для некоторых термопар.

Таблица 7.1

Термопара	Предельная температура нагрева, °С	α , мкв/град
Медь — константан	400	40
Железо — копель	600	57
Хромель — копель	700	69
Железо — константан	800	50
Хромель — алюмель	1000	41
Платина — платинородий	1300	10

Если в интервале $T_1 - T_2$ дифференциальная т. э. д. с. не зависит или слабо зависит от температуры, то т. э. д. с. равна

$$\mathcal{E} = \alpha (T_2 - T_1) . \quad (7.2)$$

С помощью термопар можно измерять температуру в широком интервале от единиц до тысяч °К. При измерениях один спай термопары помещается в среду с постоянной температурой T_1 (обычно в тающий лед — 0°С), другой спай помещается в область, где измеряется температура T . Концы цепи a и b присоединяются к потенциометру или при менее точных измерениях к милливольтметру (рис. 7.2). По формуле (7.2) определяется измеряемая температура.

Градуировка термопар может производиться двумя способами: по постоянным точкам плавления (затвердевания) и кипения химически чистых веществ или путем сравнения показаний градуируемой термопары с показаниями эталонной термопары.

На рис. 7.3 представлен график зависимости температуры от времени, характеризующий процесс затвердевания чистого кристаллического вещества. При охлаждении расплава температура непрерывно понижается (участок ab). Точка b соответствует моменту начала кристаллизации расплавленного вещества. На участке bc температура не меняется вслед-

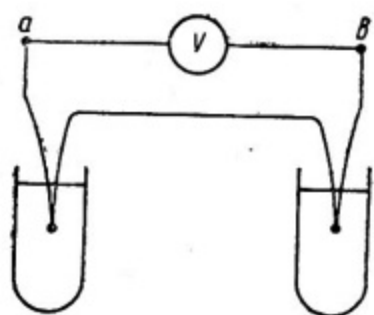


Рис. 7.2

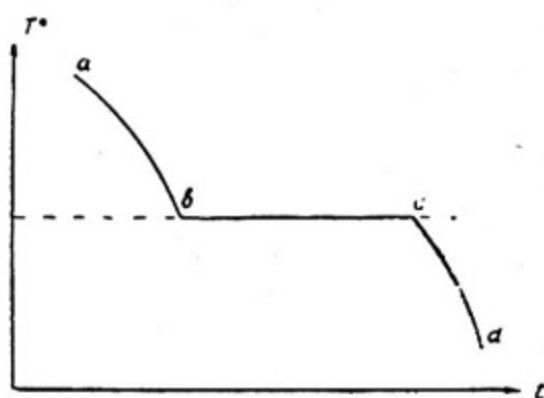


Рис. 7.3

ствие выделения теплоты кристаллизации. После того как процесс кристаллизации закончен, наблюдается дальнейшее понижение температуры (участок cd).

Если один контакт термопары находится в остывающем жидком металле, то величина т. э. д. с. должна изменяться со временем, следуя за температурой (см. рис. 7.3). Для градуирования термопары используются чистые металлы, температуры плавления (затвердевания) которых известны. Определив т. э. д. с., соответствующие этим температурам, можно построить градуировочную кривую для данной термопары — график зависимости т. э. д. с. от температуры.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы и принадлежности: 1) термопара медь — константан, 2) потенциометр типа ПП, 3) набор тиглей с чистыми металлами, 4) электрический нагреватель, 5) сосуд Дьюара. Схема установки показана на рис. 7.4. На нагревателе H помещается тигель с чистым металлом или тигель с дистиллированной водой. В тиглях T помещены заполненные маслом пробирки P , в которые вставляется спай термопары 1 . Холодный спай термопары 2 помещен в сосуд Дьюара D с тающим льдом. Измерение т. э. д. с. производят на потенциометре постоянного тока ти-

па ПП, правила работы с которым даны в работе 6. Время отсчитывают по секундомеру. В данной работе градуировку термопары проводят по точкам плавления свинца, висмута

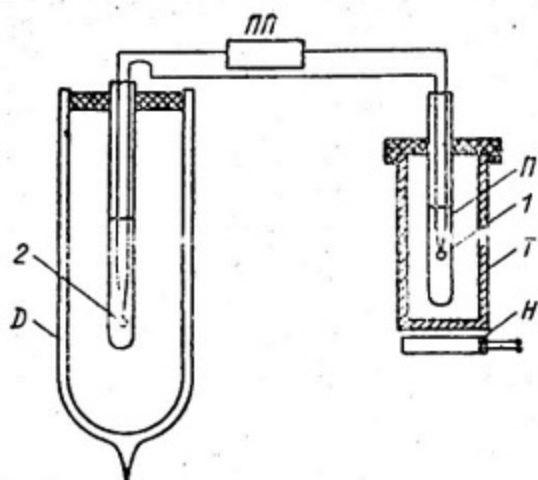


Рис. 7.4

и олова, а также по температуре кипения дистиллированной воды.

Задание

1. Внимательно ознакомиться с правилами пользования потенциометром ПП и включить его в цепь термопары.

2. Нагреть дистиллированную воду до кипения и измерить т. э. д. с., соответствующую температуре кипения воды. Эту температуру взять по таблице в соответствии с барометрическим давлением. Результат измерения внести в табл. 7.2.

3. Включить подогреватели под тиглями. После того как олово полностью расплавится (пробирка с маслом всплывет), выключить нагреватель. При охлаждении металла регистрировать показание потенциометра через каждые 30 сек, записывая результаты измерений в табл. 7.3. Когда процесс кристаллизации олова закончится и выявится область постоянной т. э. д. с., соответствующая площадке *bc* на рис. 7.3, измерения можно прекратить.

Аналогичные измерения провести для висмута и свинца.

4. По результатам измерений построить на миллиметровой бумаге ход изменения т. э. д. с. термопары со временем в олове, висмуте и свинце и по графикам определить величины т. э. д. с., соответствующие температурам плавления этих металлов. Результаты занести в табл. 7.2.

5. По полученным экспериментальным данным построить градуировочную кривую термопары и подсчитать по ней дифференциальную т. э. д. с.

Таблица 7.2

Вещество	Температура плавления или кипения, °С	Т. э. д. с.
Вода		
Олово	231,9	
Висмут	271,3	
Свинец	327,3	

Таблица 7.3

Время, сек	
Т. э. д. с., мв	

Работа 8

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Отношение заряда электрона к его массе, т. е. удельный заряд электрона в данной работе измеряется двумя методами.

МЕТОД МАГНЕТРОНА

Введение

Магнетроном называют двухэлектродную электронную лампу (диод), в которой электроны, летящие от катода к аноду, наряду с электрическим полем подвергаются воздействию внешнего магнитного поля.

В работе используется магнетрон с цилиндрическим анодом и цилиндрическим катодом, расположенным по оси анода (рис. 8.1). Электрическое поле E направлено по радиусам

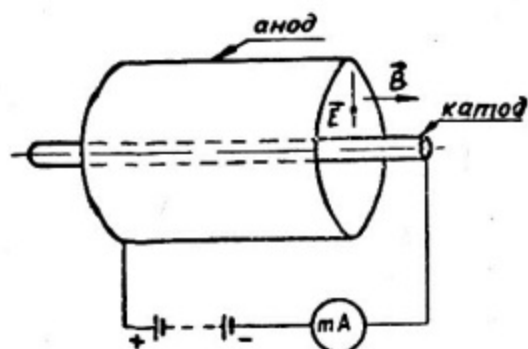


Рис. 8.1

анода, а постоянное магнитное поле B параллельно его оси. Таким образом, магнитное и электрическое поля взаимно перпендикулярны.

Если магнитное поле отсутствует, то электроны, эмиттированные катодом, под действием электрического поля E

двигаются прямолинейно по радиусам (рис. 8.2, кривая 1), и в анодной цепи возникает некоторый анодный ток, зависящий от анодного напряжения и тока накала. Если, не меняя анодного напряжения и тока накала, приложить небольшое магнитное поле B , направленное за чертеж, то под действием

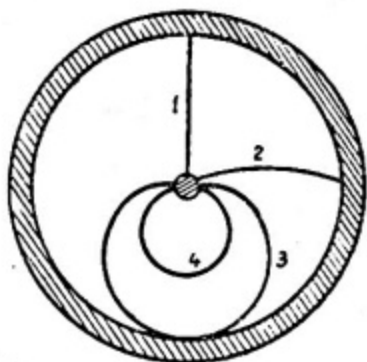


Рис. 8.2

этого поля траектории электронов искривятся (см. рис. 8.2, кривая 2), но все электроны в конечном счете попадут на анод и в анодной цепи будет протекать такой же анодный ток, как и в отсутствие магнитного поля. По мере увеличения магнитного поля траектории электронов будут все больше искривляться и при некотором значении B , называемом критическим магнитным полем $B_{кр}$, траектории электронов будут касаться анода и при дальнейшем движении электроны снова возвратятся на катод (см. рис. 8.2, кривая 3). Таким образом, при $B = B_{кр}$ анодный ток резко упадет до нуля. При дальнейшем увеличении B траектории электронов будут еще больше искривляться (см. рис. 8.2, кривая 4), и, следовательно, анодный ток будет оставаться равным нулю.

Зависимость анодного тока I_a от величины индукции магнитного поля B при постоянном анодном напряжении и постоянном токе накала называется сбросовой характеристикой магнетрона. На рис. 8.3 показаны сбросовые характеристики магнетрона для различных значений анодного напряжения U_a . Вертикальный сброс анодного тока при $B = B_{кр}$ (сплошные кривые) справедлив в предположении, что электроны покидают катод со скоростями, равными нулю. В реальных условиях электроны вылетают из катода с разными скоростями, поэтому резкой сбросовой характеристики не получается, и характеристика имеет вид пунктирной кривой.

Критическое магнитное поле есть некоторая функция от анодного напряжения

$$B_{кр} = f(U_a), \quad (8.1)$$

причем с увеличением анодного напряжения увеличивается критическое магнитное поле. Найдем значение $B_{кр}$.

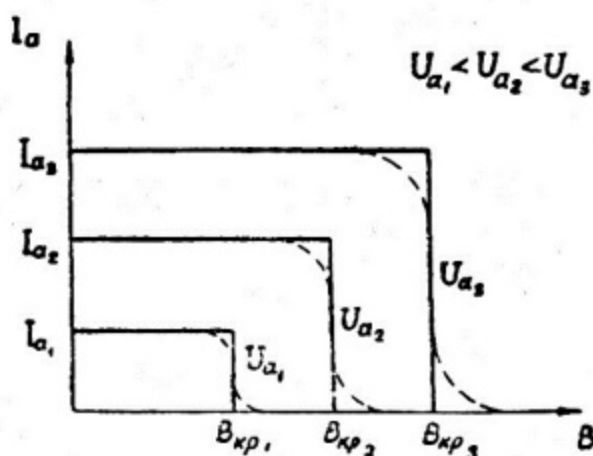


Рис. 8.3

На электрон, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца

$$F = e[vB], \quad (8.2)$$

где e — заряд электрона; v — скорость электрона; B — вектор магнитной индукции. Если магнитное поле B однородное ($B = \text{const}$) и скорость v перпендикулярна вектору B , то сила Лоренца сообщает электрону постоянное нормальное ускорение, и электрон движется по окружности в плоскости, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля. Применяв второй закон Ньютона, можно найти радиус этой окружности

$$m \frac{v^2}{R} = evB,$$

откуда

$$R = \frac{v}{\frac{e}{m} B}, \quad (8.3)$$

где m — масса электрона.

В магнетроне электроны движутся по более сложным траекториям, так как на них действует как магнитное, так и электрическое поле. В пространстве между катодом и ано-

дом напряженность электрического поля такая же, как в цилиндрическом конденсаторе, следовательно,

$$E = - \frac{U_a}{\ln \frac{r_a}{r_k}} \cdot \frac{1}{r}, \quad (8.4)$$

где U_a — разность потенциалов между анодом и катодом; r_a — радиус анода; r_k — радиус катода; r — расстояние от оси катода до исследуемой точки.

В магнетроне радиус катода r_k много меньше радиуса анода r_a . При условии $r_k \ll r_a$ из формулы (8.4) следует, что напряженность поля E , максимальная у катода, с увеличением r быстро уменьшается до нуля. Поэтому основное изменение скорости электронов происходит вблизи катода, и при дальнейшем движении их скорость будет изменяться незначительно. Приближенно можно считать, что в этом случае электроны движутся в магнитном поле с постоянной по величине скоростью и, следовательно, их траектории будут близки к окружности. Предполагая, что траектория электрона при $B = B_{кр}$ — окружность, радиус которой $R = \frac{r_a}{2}$, и используя соотношение (8.3), получаем

$$B_{кр} = \frac{v}{\frac{e}{m} \cdot \frac{r_a}{2}}. \quad (8.5)$$

Магнитное поле работы не совершает ($\mathbf{v} \perp \mathbf{F}$), поэтому кинетическая энергия электрона $\frac{mv^2}{2}$ равна работе электрического поля $A = eU_a$, следовательно,

$$v = \sqrt{\frac{2eU_a}{m}}. \quad (8.6)$$

Из соотношений (8.5) и (8.6) получим

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2}. \quad (8.7)$$

В данной работе по сбросовым характеристикам магнетрона определяют значения $B_{кр}$ и затем по формуле (8.7) вычисляют удельный заряд электрона.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) электронная лампа, 2) соленоид, 3) выпрямитель на 100—200 в, 4) выпрямитель на 10—20 в, 5) миллиамперметр, 6) два амперметра, 7) вольтметр постоянного тока, 8) реостаты, 9) ключи.

Установка состоит из двух независимых схем: обычной схемы для снятия анодной характеристики диода (рис. 8.4) и схемы питания соленоида. Диод устанавливается внутри соленоида так, чтобы ось анода совпадала с осью соленоида. Соленоид питается от выпрямителя. В цепь включены ключ, реостат и амперметр, по которому определяется сила тока, текущего в соленоиде I_c . Магнитную индукцию поля B в соленоиде определяют по градуировочному графику $B = B(I_c)$, прилагаемому к работе.

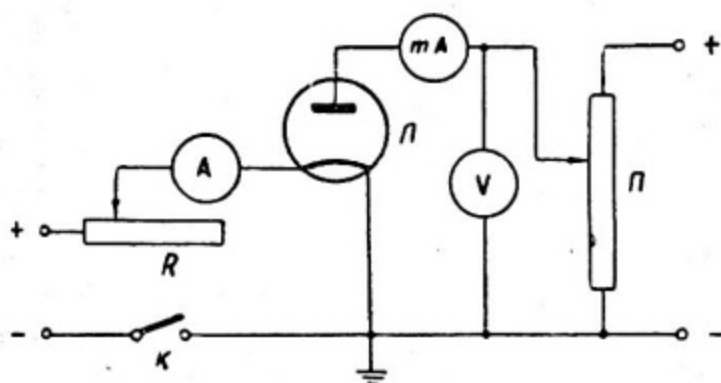


Рис. 8.4

Измерения проводятся в следующем порядке. Ключом К (см. рис. 8.4) замыкают цепь накала катода, и реостатом R устанавливают ток накала. После этого включают выпрямитель анодного напряжения и с помощью потенциометра Π устанавливают анодное напряжение. Сила анодного тока определяется по миллиамперметру mA . Затем при полностью введенном реостате, включенном в цепь соленоида, включают питание соленоида. Постепенно увеличивают ток через соленоид I_c и измеряют анодный ток I_a при фиксированных значениях I_c . В области спада анодного тока измерения должны быть произведены как можно чаще. По полученным данным строится сбросовая характеристика. Сбросовые характеристики не будут давать вертикального сброса I_a . Это объясняется, как указывалось выше, тем, что электроны покидают катод со скоростями, отличными от нуля. Кроме того, неизбежна некоторая несимметрия электродов и нарушение соосности анода и магнитного поля. Все это приводит к тому, что I_a спадает в некотором интервале значения B . Критическое значение тока в соленоиде $I_{c_{кр}}$ определяют по значению I_c , соответствующему наибольшему наклону кривой в области спадания I_a . Определив $I_{c_{кр}}$, по градуировочному графику определяют $B_{кр}$.

Задание

1. Собрать схему, данную на рис. 8.4 и схему питания соленоида.

2. Снять сбросовую характеристику. Для этого при выключенном питании соленоида установить номинальный ток накала I_n и максимальное рекомендованное напряжение U_a . Измерить анодный ток I_a . Затем включить питание соленоида и снять зависимость $I_a = f(I_c)$. При этом следить за тем, чтобы U_a и I_n были постоянными. Измеренные данные записать в табл. 8.1.

Таблица 8.1

$$I_n = \quad U_a =$$

I_c, a									
I_a, ma									

3. Снять сбросовые характеристики для всех рекомендованных значений U_a .

4. По полученным данным построить семейство сбросовых характеристик и для каждой из них определить критические значения тока в соленоиде $I_{скр}$.

5. Для каждого U_a определить $B_{кр}$ и найти среднее значение $\frac{U_a}{B_{кр}^2}$.

6. Подставить в формулу (8.7) среднее значение $\frac{U_a}{B_{кр}^2}$ и вычислить удельный заряд электрона.

МЕТОД МАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКИ (МЕТОД БУША)

Введение

Рассматриваемый метод заключается в фокусировке пучка электронов продольным магнитным полем. Схема опыта показана на рис. 8.5. Внутри вакуумной трубки создается пучок электронов, испускаемый горячим катодом К. Эти электроны ускоряются электрическим полем, созданным между катодом К и анодом А. На пути электронного пучка, вышедшего из отверстия в аноде, помещена диафрагма D с кольцевой щелью. За диафрагму D проходят только те электроны, которые движутся по образующим конуса с углом раскрытия 2α . На противоположном конце трубки имеется флуоре-

сцирующий экран Э. Трубка помещается в соленоид, создающий внутри трубки однородное магнитное поле, направленное параллельно оси электронного пучка.

В случае, когда скорость электрона составляет угол α с направлением \mathbf{B} , удобно v разложить на две составляю-

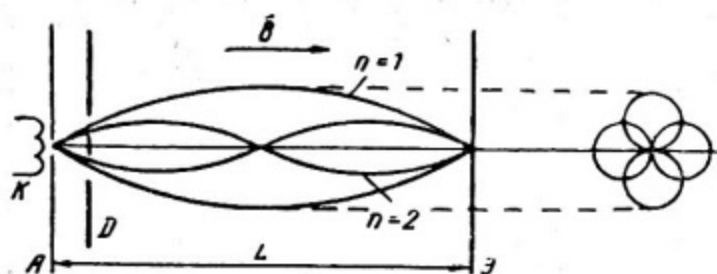


Рис. 8.5

щие: параллельную v_{\parallel} и перпендикулярную v_{\perp} . Они равны:

$$v_{\parallel} = v \cos \alpha; \quad v_{\perp} = v \sin \alpha.$$

Сила Лоренца (8.2) лежит в плоскости, перпендикулярной \mathbf{B} , следовательно, проекция траектории электрона на плоскость, перпендикулярную \mathbf{B} (в данном случае на плоскость, перпендикулярную оси трубки), будет окружностью. Радиус этой окружности может быть получен аналогично тому, как была выведена формула (8.3), он равен:

$$R = \frac{mv_{\perp}}{eB}.$$

Период обращения электрона по этой окружности

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi}{\frac{e}{m} B}. \quad (8.8)$$

Составляющая силы Лоренца в направлении \mathbf{B} равна нулю, следовательно, в этом направлении электрон движется равномерно со скоростью v_{\parallel} . Результирующая траектория электрона — цилиндрическая спираль, ось которой совпадает с \mathbf{B} . Шаг спирали l равен:

$$l = v_{\parallel} T = \frac{2\pi v \cos \alpha}{\frac{e}{m} B}.$$

На рис. 8.5 показаны проекции траекторий электронов, вылетевших из диафрагмы D под одним и тем же углом α , на плоскость, перпендикулярную оси трубки. Эти проекции представляют собой окружности одинакового радиуса соприкасающиеся в точке, лежащей на оси трубки. На расстоянии от анода, равном шагу спирали l , все электроны совер-

шат полный оборот и соберутся в точке, лежащей на оси трубки. Электронный пучок будет сфокусирован. То же произойдет в точках на оси, лежащих на расстоянии, кратном l .

Следовательно, условие фокусировки электронного пучка на экране трубки состоит в том, что расстояние от анода А до экрана Э должно быть равно

$$L = nl = n \frac{2\pi v \cos \alpha}{\frac{e}{m} B}, \quad (8.9)$$

где n — целое число.

Если расстояние от анода А до экрана Э трубки будет равно L , то электроны соберутся (сфокусируются) в центре флуоресцирующего экрана. На рис. 8.5 показано сечение пучка электронов при $n=1$ и при $n=2$.

Скорость электронов определяется разностью потенциалов U_a между анодом и катодом и может быть вычислена по формуле (8.6).

Из соотношений (8.9) и (8.6) получаем формулу для вычисления удельного заряда электрона

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 n^2 U_a \cos^2 \alpha}{L^2 B^2}. \quad (8.10)$$

Итак, измерив значение U_a и B , при которых происходит фокусировка электронного пучка на экране, можно определить удельный заряд электрона.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) электронно-лучевая трубка и блок питания к ней, 2) соленоид, 3) выпрямитель, 4) амперметр, 5) вольтметр, 6) конденсатор, 7) реостаты, 8) ключ.

Схема установки показана на рис. 8.6. Электронно-лучевая трубка помещена в длинный соленоид. Соленоид питается от выпрямителя. В цепь соленоида включены ключ, реостат и амперметр, по которому определяется ток I_c , текущий в соленоиде. Индукция магнитного поля в соленоиде B определяется по градуировочному графику $B = f(I_c)$, прилагаемому к работе.

Ускоряющее электроны напряжение U_a определяется разностью потенциалов между вторым анодом и катодом (см. рис. 8.6). U_a измеряется вольтметром V . Управление электронным лучом осуществляется так же, как и у обычного осциллографа. Для того чтобы начальные скорости электронов были направлены под углом α к оси трубки (к вектору магнитной индукции B), применяется круговая развертка. Для этого на отклоняющие пластины поданы напряжения

частотой 50 гц, сдвинутые по фазе относительно друг друга на 90° . Схема круговой развертки показана на рис. 8.6. На одну пару отклоняющих пластин подано переменное напряжение на конденсаторе, а на вторую — напряжение на омическом сопротивлении, включенном в цепь конденсатора.

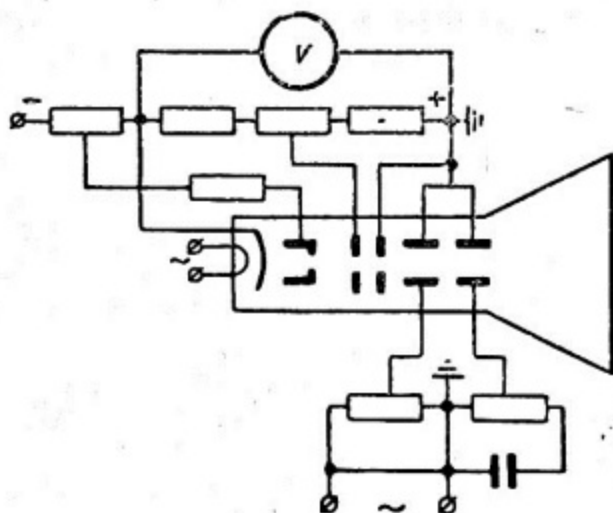


Рис. 8.6

ческом сопротивлении, включенном в цепь конденсатора. Известно, что эти напряжения сдвинуты по фазе на 90° [см. работу 12, формулы (12.15) и (12.17)].

Таким образом, в отсутствие магнитного поля электронный луч образует конус с углом раствора 2α и с вершиной, находящейся в центре второго анода; на экране при этом виден круг.

В данной работе разность потенциалов U_a остается постоянной и фокусировка пучка электронов достигается за счет изменения магнитной индукции B .

Задание

1. Включить питание электронно-лучевой трубки. Записать значение ускоряющей разности потенциалов U_a .
2. Сфокусировав электронный луч, включить круговую развертку и измерить диаметр круга на экране. Вычислить α .
3. При полностью введенном реостате, включенном в цепь соленоида, замкнуть цепь питания соленоида. Постепенно увеличивать ток в обмотке соленоида I_c и получить первую ($n=1$), вторую ($n=2$) и т. д. фокусировки электронного пучка. Записать значения I_c , при которых электронный пучок фокусируется. Во избежание перегрева обмотки соленоида включать ток в соленоиде только на время измерений.
4. По полученным значениям I_c определить, пользуясь градуировочным графиком, соответствующие значения B и по формуле (8.10) вычислить удельный заряд электрона.

Работа 9

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ЖЕЛЕЗЕ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

ВВЕДЕНИЕ

Основной характеристикой магнитного поля, определяющей действие этого поля на ток, является вектор магнитной индукции \mathbf{B} . Для описания магнитного поля кроме вектора \mathbf{B} применяется также вектор напряженности магнитного поля \mathbf{H} . В изотропной магнетике векторы \mathbf{B} и \mathbf{H} связаны соотношением

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}, \quad (9.1)$$

где μ — безразмерная величина, характеризующая магнитные свойства вещества и называемая магнитной проницаемостью среды; μ_0 — магнитная постоянная.

Если во внешнее магнитное поле, характеризуемое векторами \mathbf{B}_0 и \mathbf{H}_0 , внести магнетик произвольной формы, то в общем случае вектор \mathbf{H} в магнетике отличен от \mathbf{H}_0 . Связь между \mathbf{H} и \mathbf{H}_0 сложная и зависит от формы магнитного образца. В частном случае, когда однородный магнетик заполняет все пространство, где имеется магнитное поле, или магнетик имеет такую форму, при которой линии намагничивающего внешнего поля не пересекают поверхности магнетика, вектор \mathbf{H} равен вектору \mathbf{H}_0 . Следовательно, в указанных частных случаях напряженность поля в магнетике определяется внешним магнитным полем и не зависит от магнитных свойств магнетика. Вектор \mathbf{B} в этом случае увеличивается в μ раз (так как $\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}_0$).

Вещества, способные сильно намагничиваться, называются ферромагнетиками. Ферромагнетиками являются железо, кобальт, никель, гадолиний, их соединения и сплавы, сплавы хрома и марганца.

Характерной особенностью ферромагнетиков является сложная нелинейная зависимость между магнитной индукцией B и напряженностью поля H . Это значит, что магнитная

проницаемость μ ферромагнетиков зависит от напряженности магнитного поля H . Максимальные значения μ в ферромагнетиках очень велики (достигают значений 10^5 — 10^6). Кроме того, при выключении намагничивающего поля в ферромагнетиках сохраняется остаточное намагничивание.

На рис. 9.1 дана кривая зависимости индукции B от напряженности магнитного поля H для чистого мягкого железа (остаточное намагничивание равно нулю). Опыт показывает,

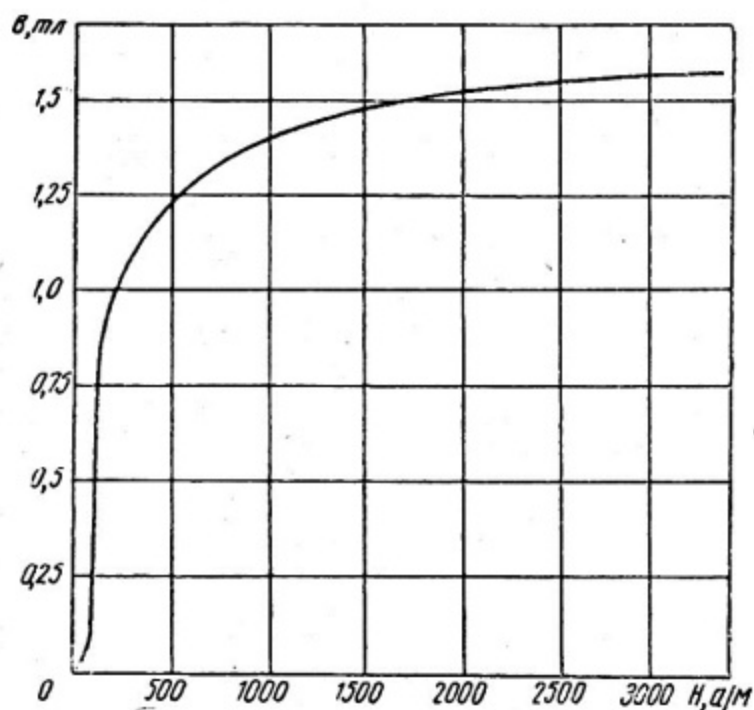


Рис. 9.1

что форма кривой зависит от химического состава вещества, от его температуры, от предшествующей термообработки исследуемого образца и от существующих в нем упругих напряжений.

Исследуя форму кривой $B = f(H)$, которую называют кривой индукции, определяют магнитные свойства данного ферромагнетика. Например, по значениям B и H можно построить кривую зависимости магнитной проницаемости μ от H . При этом используется формула (9.1), которая справедлива и для ферромагнетика, если считать μ функцией H .

При исследовании магнитных свойств вещества необходимо получить кривую индукции как функцию магнитного поля H в образце, которое для образцов произвольной формы может быть не равно внешнему.

Следовательно, в случае магнетика произвольной формы при переходе от значений напряженности внешнего магнит-

ного поля H_0 к значениям H внутри образца необходимо ввести поправку на форму образца. Эту поправку называют размагничивающим фактором.

При изучении магнитных свойств вещества исследуемый образец обычно имеет форму замкнутого тороида. Такая форма образца является наиболее удобной, так как для нее размагничивающий фактор равен нулю. Действительно, если радиус поперечного сечения тора достаточно мал по сравнению с радиусом самого тора, то магнитное поле, создаваемое током, текущим по обмотке тороида, однородно. Силовые линии внутри образца не пересекают его поверхность и образуют систему концентрических окружностей вокруг общего с тором центра. В этом случае напряженность поля в образце равна напряженности внешнего магнитного поля, т. е. напряженности поля, создаваемого намагничивающей обмоткой в отсутствие магнетика.

Экспериментальное исследование кривой магнитной индукции может быть проведено различными методами. В данной задаче используется предложенный Столетовым баллистический метод. Сущность метода заключается в следующем. В исследуемое магнитное поле помещается измерительная катушка, состоящая из нескольких витков провода. Размер катушки определяется степенью неоднородности поля. Очевидно, что чем неоднороднее поле, тем меньших размеров должна быть катушка.

Магнитный поток через сечение катушки равен

$$\Phi = BS,$$

где S — площадь сечения витка катушки.

При изменении магнитного потока через катушку в ней возникает электродвижущая сила индукции \mathcal{E}_i , и если цепь катушки замкнута, то пойдет ток

$$i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{N}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt},$$

где N — число витков измерительной катушки; R — сопротивление цепи катушки.

При изменении магнитного потока на величину $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ в цепи катушки протечет количество электричества

$$q = \int_0^t idt = \frac{N}{R} \int_0^t \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{N}{R} \Delta\Phi.$$

Для измерения q в цепь катушки включается зеркальный гальванометр, работающий в баллистическом режиме. Это значит, что период гальванометра много больше времени протекания заряда и, следовательно, отброс баллистического

гальванометра пропорционален количеству протекшего через него электричества. Если отклонение гальванометра a делений, то величина заряда, вызвавшего это отклонение, вычисляется по формуле

$$q = C_q a, \quad (9.2)$$

где C_q — баллистическая постоянная гальванометра, определяющая цену деления гальванометра. Обычно баллистическая постоянная дается в кулонах на деление шкалы.

Следовательно, измеряя отброс гальванометра при достаточно быстром изменении магнитного потока через измерительную катушку, можно определить величину изменения магнитного потока, а затем — индукцию магнитного поля. Изменение магнитного потока через измерительную катушку в изучаемом магнитном поле можно осуществить двумя способами: изменяя положение катушки в магнитном поле, например поворачивая ее, или изменяя величину или направление магнитного поля.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) баллистический гальванометр, 2) железный торонд с намагничивающей и измери-

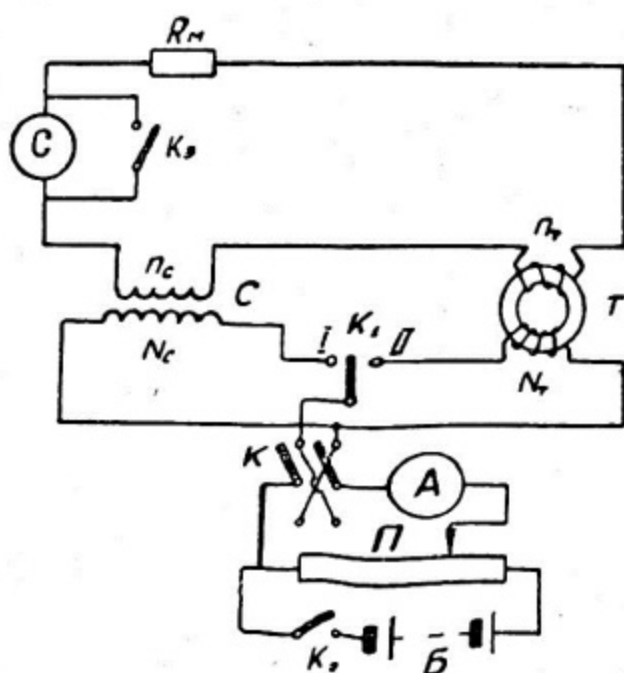


Рис. 9.2

тельной обмотками, 3) нормальный соленоид с измерительной обмоткой, 4) амперметр постоянного тока на 5 а, 5) ключи и переключатель, 6) магазин сопротивлений.

В данной работе исследуется кривая магнитной индукции для мягкого железа. Измерения проводятся на установке, схема которой показана на рис. 9.2. На железный тороид T равномерно намотана намагничивающая обмотка N_T . Измерительная катушка n_T состоит из нескольких витков провода, намотанных на намагничивающую обмотку тороида, и включена в цепь баллистического гальванометра G .

Нормальный соленоид C служит для определения баллистической постоянной гальванометра. Вторичная обмотка нормального соленоида n_c , а также магазин сопротивлений R_M включены в цепь гальванометра; K_3 — тормозной ключ — служит для успокоения гальванометра. Намагничивающая обмотка тороида N_T и первичная обмотка нормального соленоида N_c могут быть подключены к батарее B . Меняя положение переключателя K_1 , попеременно подают напряжение в намагничивающую обмотку тороида N_T и в обмотку нормального соленоида N_c . Потенциометр Π служит для регулировки подаваемого напряжения, амперметр постоянного тока A фиксирует ток в схеме. Коммутатор K служит для изменения направления, подаваемого в схему напряжения.

Изменение магнитного потока, пересекающего измерительную катушку n_T , производится путем изменения направления тока в намагничивающей обмотке N_T на обратное. Такое изменение направления тока называют коммутацией тока. При коммутации тока в намагничивающей обмотке N_T (переключатель K_1 в положении II , см. рис. 9.2), вектор B меняет направление на обратное, и магнитный поток через сечение измерительной катушки изменяется на величину

$$\Delta\Phi = 2BS_T.$$

В результате через гальванометр протекает количество электричества

$$q = \frac{n_T}{R} \Delta\Phi = \frac{2n_T S_T}{R} B.$$

При этом гальванометр дает отброс α . Используя формулу (9.2), получаем

$$B = \frac{qR}{2n_T S_T} = \frac{C_q R}{2n_T S_T} \alpha, \quad (9.3)$$

где α — отброс гальванометра при коммутации тока в намагничивающей обмотке тороида; C_q — баллистическая постоянная гальванометра; S_T — сечение тороида; n_T — число витков измерительной катушки; R — сопротивление цепи гальванометра, составленной из измерительных обмоток нормального соленоида и тороида, магазина сопротивлений, гальванометра и соединительных проводов.

Для определения баллистической постоянной гальванометра в данной работе выбран метод «нормального соленоида». Нормальный соленоид представляет собой соленоид, длина которого значительно больше диаметра.

В средней части соленоида намотана вторичная обмотка n_c , включенная в цепь баллистического гальванометра G . Магнитная индукция поля в средней части нормального соленоида вычисляется по формуле

$$B_c = \mu_0 \frac{N_c I_c}{L} \text{ а.к.},$$

где I_c — ток в нормальном соленоиде; N_c — число витков первичной обмотки нормального соленоида; L — длина нормального соленоида; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ гн/м.

При коммутации тока в первичной обмотке нормального соленоида (переключатель K_1 в положении I , рис. 9.2) через гальванометр протекает количество электричества

$$q_1 = \frac{n_c}{R} \Delta\Phi = \frac{2n_c S_c}{R} B_c k,$$

где n_c — число витков измерительной обмотки нормального соленоида; S_c — сечение соленоида; R — сопротивление цепи гальванометра.

Измерив отброс гальванометра β при коммутации, можно определить баллистическую постоянную гальванометра по формуле

$$C_q = \frac{q_1}{\beta} = \frac{2\mu_0 n_c N_c S_c}{LR} \cdot \frac{I_c}{\beta} \text{ к'дел.} \quad (9.4)$$

В цепь гальванометра при всех измерениях последовательно включены обе измерительные обмотки n_T и n_c (см. рис. 9.2). Следовательно, при измерении магнитной индукции в образце и при измерении баллистической постоянной гальванометра полное сопротивление цепи гальванометра R остается одним и тем же, если не меняется сопротивление магазина R_M . В этом случае удобно вычислить постоянную установки

$$\gamma_R = \frac{RC_q}{2n_T S_T} = \frac{\mu_0 n_c N_c S_c}{n_T S_T L} \cdot \frac{I_c}{\beta} \text{ мл/дел.} \quad (9.5)$$

Из формул (9.3) и (9.5) следует, что величина измеряемой индукции определяется по формуле

$$B = \gamma_R \alpha \text{ тл.} \quad (9.6)$$

Напряженность магнитного поля в образце, создаваемая намагничивающей обмоткой тороида, вычисляется по формуле

$$H_T = \frac{N_T I_T}{\pi D_T} \text{ а/м}, \quad (9.7)$$

где N_T — число витков намагничивающей обмотки тороида; D_T — диаметр тороида; I_T — сила тока в намагничивающей обмотке тороида.

З а д а н и е

1. Сборка схемы

Собрать схему согласно рис. 9.2.

При сборке схемы следует проверить изоляцию обмоток измерительных катушек и проводов в цепи гальванометра. Необходимо помнить, что при всех переключениях в схеме гальванометр должен быть отключен (ключ K_3 замкнут). Гальванометр включается только в момент измерений.

2. Измерение индукции

Переключатель K_1 ставят в положение II и, установив потенциометр Π на минимум, замыкают ключ K_2 . С помощью потенциометра Π устанавливают нужное значение тока I_T в цепи намагничивающей обмотки тороида, переключателем K производят коммутацию тока и определяют отброс гальванометра α . Сопротивление R_M в цепи гальванометра подбирают таким, чтобы отброс гальванометра был достаточно большим. Замыканием тормозного ключа K_3 возвращают «зайчик» гальванометра на нуль. При каждом значении тока I_T производят две коммутации тока, которым соответствует отклонение «зайчика» гальванометра вправо и влево от нулевого деления, и определяют среднее значение $\alpha_{\text{ср}}$. Измерение индукции начинают при минимальных значениях тока в намагничивающей обмотке, и затем ток постепенно повышают до максимального значения. В начале измерений (в области крутого подъема кривой индукции) необходимо делать отсчеты через каждые $0,1 \text{ а}$. В области пологой части достаточно проводить измерения через $0,5 \text{ а}$.

Результаты измерений записывают в табл. 9.1.

Таблица 9.1

$I_T, \text{ а}$	$R_M, \text{ ом}$	α_1	α_2	$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$

Для того чтобы снять кривую индукции с ее нулевого значения, образец перед измерениями должен быть размагничен. Процесс размагничивания производится следующим способом. Отключают гальванометр (закрывают тормозной ключ K_3) и в цепи намагничивающей обмотки тороида устанавливают ток 4—5 а (ключ K в положении II). Затем, производя непрерывное коммутирование тока, медленно снижают ток до нулевого значения. После этого образец оказывается практически размагниченным. Если при измерениях индукции случайно через намагничивающую обмотку тороида будет пропущен слишком большой ток, то кривая индукции может быть искажена. В этом случае необходимо размагнитить образец и затем продолжать измерения.

3. Измерение постоянной установки

Постоянная установки γ_R определяется для всех значений сопротивления цепи гальванометра, при которых производились измерения индукции. Переключатель K_1 ставят в положение I и устанавливают ток в цепи первичной обмотки нормального соленоида не больше 3 а. Производят коммутацию тока в цепи нормального соленоида и определяют отброс гальванометра β .

Коммутирование тока производят три — пять раз, и затем измерения повторяют при другом значении тока. Результаты измерений записывают в таблицу, аналогичную табл. 9.1. По формуле (9.5) вычисляют среднее значение постоянной установки для определенного значения сопротивления цепи гальванометра.

4. Обработка результатов измерений

1. Вычислить напряженность магнитного поля H и магнитную индукцию B в образце. Полученные данные занести в табл. 9.2.

Таблица 9.2

I_T, a	$a_{ср}$	$B, тл$	$H, a/м$	μ

2. По полученным данным построить кривую магнитной индукции.

3. Построить кривую $\mu = \mu(H)$.

Работа 10

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА

ВВЕДЕНИЕ

Явление испускания электронов нагретыми металлами называется термоэлектронной эмиссией.

Для изучения термоэлектронной эмиссии может быть применена схема, показанная на рис. 10.1. Электрическая цепь содержит вакуумный диод, источники напряжения и миллиамперметр. Катод вакуумного диода представляет собой нить

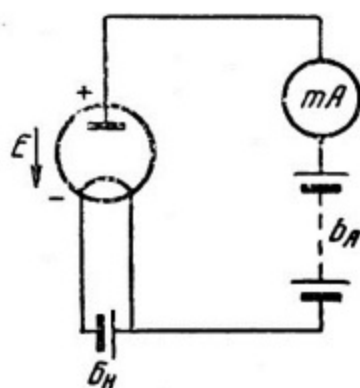


Рис. 10.1

из исследуемого металла, которая может нагреваться электрическим током. Анод обычно имеет форму цилиндра, внутри которого расположен катод. В цепи появляется ток только в случае, когда катод раскален и если потенциал анода положителен относительно катода. Опыт показывает, что ток в цепи зависит от температуры катода и от разности потенциалов между анодом и катодом, т. е. от анодного напряжения U_a .

Явление термоэлектронной эмиссии можно объяснить на основании современных представлений о строении металлов. Металл представляет собой кристаллическое тело, в узлах ре-

шетки которого расположены положительно заряженные ионы. Между ионами находятся валентные электроны, которые могут свободно перемещаться внутри металла (электроны проводимости).

Вблизи поверхности металла существует потенциальный барьер, препятствующий выходу электронов из металла, и, следовательно, для того чтобы удалить электрон из металла, нужно затратить некоторую энергию.

Можно считать, что потенциальная энергия электронов на границе металл — вакуум изменяется, как показано на рис. 10.2, где O — уровень потенциальной энергии электрона вне металла, A — уровень потенциальной энергии электрона

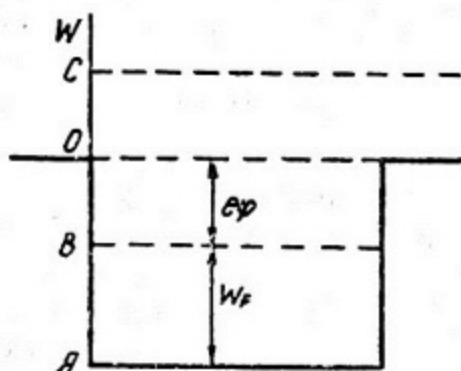


Рис. 10.2

внутри металла. Потенциальная энергия электрона вне металла полагается равной нулю, следовательно, внутри металла она отрицательна.

Для того чтобы электрон мог покинуть пределы металла, его кинетическая энергия W_k должна быть не меньше AO . Если электрону сообщить дополнительную энергию, такую, что W_k окажется больше AO , например равна AC , то электрон, покинув металл, будет иметь кинетическую энергию, равную OC .

Распределение свободных электронов по энергиям в металле подчиняется определенному закону (распределение Ферми — Дирака), из которого следует, что только незначительная часть электронов в металле обладает кинетическими энергиями, большими некоторого значения W_F , называемого уровнем Ферми. Уровень Ферми является характеристикой данного металла, причем $W_F < AO$.

Энергию, равную разности между высотой потенциального барьера и уровнем Ферми, называют работой выхода электрона из металла. Работу выхода принято обозначать через $e\phi$ (e — заряд электрона, ϕ — потенциал выхода). Обычно $e\phi$ измеряется в электронвольтах.

При комнатной температуре количество электронов, обладающих энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера, незначительно. При нагревании металла количество таких электронов резко возрастает, и возникает термоэлектронная эмиссия.

Вернемся к схеме опыта, изображенной на рис. 10.1. Если катод нагреть до некоторой температуры, то вылетевшие из него электроны образуют электронное облако над поверх-

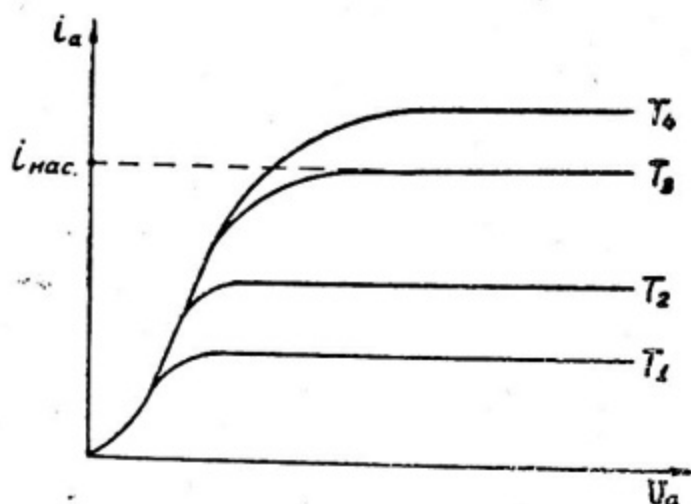


Рис. 10.3

ностью металла. Электроны не могут совсем уйти от металла, так как на них действует кулоновская сила притяжения со стороны оказавшегося положительно заряженным металла. Электроны вылетают и снова возвращаются в металл, так что устанавливается динамическое равновесие, подобное равновесию между жидкостью и ее насыщенными парами.

Если с помощью внешнего источника напряжения создать электрическое поле, направленное от анода к катоду, то электронное облако около катода будет рассасываться и в цепи возникнет электрический ток. Величина тока зависит от плотности электронного облака, т. е. от температуры катода и от напряженности электрического поля. Если напряженность поля выбрать такой, чтобы каждый электрон, вылетевший из катода, попадал на анод, то величина анодного тока будет зависеть только от температуры катода и установится ток насыщения.

Кривую зависимости тока в диоде от анодного напряжения называют вольт-амперной характеристикой диода. На рис. 10.3 представлено семейство вольт-амперных характеристик; каждая кривая соответствует определенной температуре катода ($T_1 < T_2 < T_3 < T_4$). При увеличении анодного напря-

жения U_a возрастает анодный ток i_a . При некотором напряжении U_a анодный ток достигает максимального значения, называемого током насыщения, и перестает зависеть от анодного напряжения U_a .

Из графика видно, что диод является нелинейным сопротивлением, т. е. для него не выполняется закон Ома.

Плотность тока насыщения $j_{нас}$, т. е. ток с единицы площади поверхности катода, зависит от температуры катода и от работы выхода электрона из металла $e\phi$. Эта зависимость выражается законом, известным под названием формулы Ричардсона

$$j_{нас} = AT^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}} \quad (10.1)$$

(T — абсолютная температура; k — постоянная Больцмана).

Из теории следует, что постоянная A должна быть одинакова для всех металлов и равна $1,2 \cdot 10^6 \text{ а} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}^{-2}$. В действительности эта постоянная для разных металлов несколько различна; ее значение для каждого металла определяют экспериментально.

Теоретическая формула (10.1) хорошо согласуется с экспериментально полученными кривыми зависимости плотности тока насыщения от температуры. Измеренная на опыте работа выхода оказывается различной для разных металлов и имеет величину порядка нескольких электронвольт.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) радиолампа типа ГУ4, 2) выпрямитель на 200—300 в, 3) два вольтметра, 4) миллиамперметр, 5) амперметр, 6) батарея аккумуляторов, 7) реостаты, 8) ключ.

Целью работы является определение работы выхода для вольфрама по экспериментальным вольт-амперным характеристикам. Для этого исследуется генераторный триод с вольфрамовой нитью накала. В данной работе триод выполняет

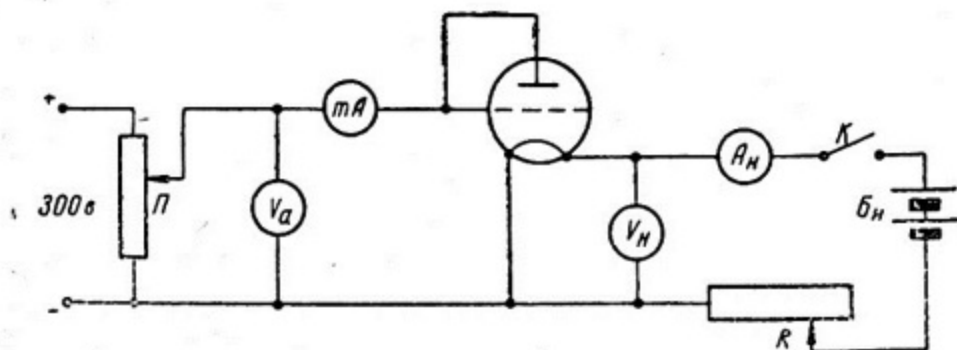


Рис. 10.4

роль диода, т. е. сетка соединена с анодом и существенной роли не играет. Схема представлена на рис. 10.4, где П — потенциометр анодного напряжения; mA — миллиамперметр анодной цепи; V_a — вольтметр анодного напряжения; A_n — амперметр цепи накала; V_n — вольтметр цепи накала; B_n — батарея накала; R — реостат цепи накала; К — ключ цепи накала.

Анодное питание берется от выпрямителя.

Задание

1. Собрать схему, показанную на рис. 10.4.
2. Снять пять вольт-амперных характеристик при различных температурах катода, т. е. при различных напряжениях накала U_n . Для этого при постоянном U_n изменять анодное напряжение U_a и отмечать соответствующие значения i_a . Значение напряжений накала, при которых снимаются вольт-амперные характеристики, указаны на установке. Для каждого значения U_n необходимо записать соответствующее значение тока накала I_n , которое понадобится для расчетов.

Полученные зависимости представить графически, откладывая анодное напряжение U_a по оси абсцисс и анодный ток i_a по оси ординат.

3. Построить графики $i_{нас} = f(T)$ и $\ln i_{нас} = f\left(\frac{1}{T}\right)$.
4. По полученным данным определить работу выхода $e\phi$ для вольфрама.
5. Оценить доверительный интервал в определении $e\phi$.

Обработка результатов измерений

Определение температуры катода

Температуру катода можно определить, воспользовавшись зависимостью сопротивления металла от температуры.

Сопротивление нити при температуре t

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (10.2)$$

где R_0 — сопротивление нити накала при 0°C ; α — температурный коэффициент сопротивления металла (для вольфрама $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}$).

При комнатной температуре сопротивление нити

$$R_k = R_0(1 + \alpha t_k). \quad (10.3)$$

Исключив R_0 из (10.2) и (10.3), получим

$$t = \frac{R_t}{R_k} \left(\frac{1}{\alpha} + t_k \right) - \frac{1}{\alpha}, \quad (10.4)$$

где $R_t = \frac{U_n}{I_n}$ (по закону Ома).

Определение работы выхода для вольфрама

Определять работу выхода удобно графически. Логарифмируя формулу (10.1), получаем

$$\ln j_{\text{нас}} = \ln A + \ln T^2 - \frac{e\varphi}{kT}.$$

Так как $\ln T^2$ изменяется медленно по сравнению с $\frac{1}{T}$, то с большой степенью точности вместо формулы (10.1) можно пользоваться соотношением

$$\ln j_{\text{нас}} = \text{const} - \frac{e\varphi}{kT}. \quad (10.5)$$

График зависимости $\ln j_{\text{нас}}$ от $\frac{1}{T}$ должен представлять собой прямую линию. Тангенс угла наклона этой прямой к оси $\frac{1}{T}$ равен $\frac{e\varphi}{k}$. При вычислении $e\varphi$ в соотношении (10.5) вместо плотности тока $j_{\text{нас}}$ можно подставлять ток насыщения $i_{\text{нас}}$ и при этом в любых единицах.

Работу выхода вычислить в электронвольтах.

Примечание. В формуле (10.5) под знаком \ln стоит размерная величина, что, казалось бы, лишено смысла. Однако в физике часто пользуются при расчетах формулами подобного вида, отвлекаясь на время вычислений от размерностей величин и оперируя с ними как с числами. По окончании вычислений полученным числовым значениям величин снова приписывается их размерность.

Работа II

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ПРОСТОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

ВВЕДЕНИЕ

Простой колебательный контур состоит из емкости C , индуктивности L и активного сопротивления R (рис. 11.1). Если предварительно заряженный конденсатор замкнуть на индуктивность, то в контуре возникнут электромагнитные колебания.

Действительно, при замыкании ключа конденсатор C начнет разряжаться — в контуре появится нарастающий ток и пропорциональное ему магнитное поле. Изменение магнит-

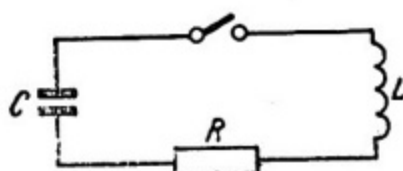


Рис. 11.1

ного поля приводит к возникновению в контуре э. д. с. самоиндукции, которая сначала замедляет скорость разряда конденсатора, но, после того как конденсатор полностью разрядился, начинает поддерживать ток в прежнем направлении. В результате происходит перезарядка конденсатора. Затем процесс разряда начнется снова, но в обратном направлении и т. д.

Во время разряда конденсатора его электростатическая энергия превращается в энергию магнитного поля тока в контуре и наоборот.

Промежуток времени, в течение которого конденсатор разряжается и заряжается снова, возвращаясь в исходное состояние, называется периодом свободных колебаний.

Максимальные значения напряжения на конденсаторе U_m и тока в контуре I_m носят название амплитуд колебаний напряжения и тока. Так как контур всегда обладает некоторым активным сопротивлением R , то часть энергии электромагнитных колебаний превращается в тепло, вследствие чего амплитуда колебаний в контуре постепенно уменьшается*. С увеличением R затухание колебаний происходит быстрее, и, наконец, при достаточно большом R колебания вообще не возникают — наблюдается аperiодический разряд конденсатора.

Найдем уравнение, описывающее свободные колебания в данном контуре. Заряд q и напряжение U на конденсаторе связаны соотношением $q = CU$, откуда ток в контуре

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU}{dt}. \quad (11.1)$$

Изменение тока во времени вызывает э. д. с. самоиндукции

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{di}{dt} = -LC \frac{d^2U}{dt^2}. \quad (11.2)$$

Согласно закону Ома для полной цепи

$$iR + U = \mathcal{E}_s. \quad (11.3)$$

Подставляя в уравнение (11.3) соотношения (11.1) и (11.2), получаем

$$\frac{d^2U}{dt^2} + 2\beta \frac{dU}{dt} + \omega_0^2 U = 0, \quad (11.4)$$

где

$$\beta = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}. \quad (11.5)$$

Из теории колебаний известно, что уравнение такого вида при условии $\beta^2 < \omega_0^2$ имеет следующее решение:

$$U = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (11.6)$$

где

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}.$$

Следовательно, в рассматриваемом контуре возникают свободные затухающие колебания с частотой ω . Период колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \quad (11.7)$$

С увеличением коэффициента затухания β период колебаний T растет, стремясь к бесконечности при $\beta \rightarrow \omega_0$. Это оз-

* Уменьшение энергии электромагнитных колебаний из-за потерь на излучение для контура, используемого в данной работе, пренебрежимо мало, и поэтому не принимается во внимание.

начает, что колебательный процесс разряда переходит в апериодический. Для контура с определенными значениями L и C апериодический процесс, как видно из последней формулы, осуществляется при $R \geq R_k$, где

$$R_k = 2 \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (11.8)$$

Для характеристики затухания колебаний часто пользуются логарифмическим декрементом затухания λ :

$$\lambda = \ln \frac{a_1}{a_2} = \beta T, \quad (11.9)$$

где a_1 и a_2 — амплитуды колебаний (напряжения или тока), которые соответствуют моментам времени, отличающимся на период.

В ряде случаев колебательный процесс целесообразнее исследовать, изучив непосредственно зависимость U от i . Кривая, изображающая эту зависимость, называется фазовой кривой. В отсутствие затухания в контуре фазовая кривая $U=f(i)$ имеет форму эллипса (эллипс получается, как известно, в результате сложения двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний одинаковой частоты).

При наличии затухания в контуре амплитуда колебаний уменьшается со временем, что приводит к более сложной форме фазовой кривой — скручивающейся спирали. Ее можно непосредственно наблюдать на экране осциллографа (рис. 11.2) при определенном подключении его к контуру.

ОПИСАНИЕ СХЕМЫ

Необходимые приборы: 1) магазин сопротивлений, 2) магазин индуктивностей, 3) магазин емкостей, 4) источник постоянного напряжения, 5) реле, 6) электронный осциллограф.

Исследование свободных затухающих колебаний проводится на схеме, показанной на рис. 11.2. Конденсатор C с помощью реле автоматически подключается то к источнику постоянного напряжения B (зарядка конденсатора), то к индуктивности L и сопротивлению R (разряд конденсатора в контуре). Такое переключение происходит с частотой 50 гц и достигается тем, что при изменении направления переменного тока через электромагнитное реле его якорь-переключатель (магнитомягкое железо) притягивается то к одному, то к другому полюсу, замыкая клемму 0 поочередно с 1 и 2 .

Наблюдения проводят на экране осциллографа, клеммы которого $в, г, з$ соединены проводниками с соответствующими точками контура, обозначенными теми же буквами. Если включить генератор временной развертки осциллографа и

синхронизовать его частоту с частотой переключения реле, то на экране будет наблюдаться картина, изображенная на рис. 11.3. Здесь S соответствует 0,02 сек (т. е. периоду ко-

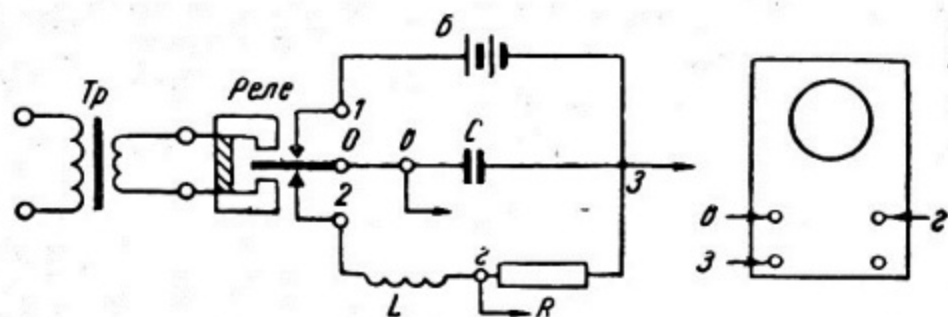


Рис. 11.2

лебания тока во внешней сети), а S_0 — периоду колебания T в контуре.

Для получения фазовой кривой $U(i)$, т. е. зависимости напряжения на конденсаторе от тока в контуре, достаточно

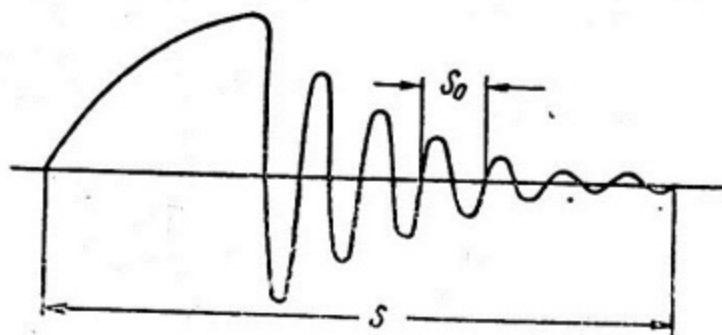


Рис. 11.3

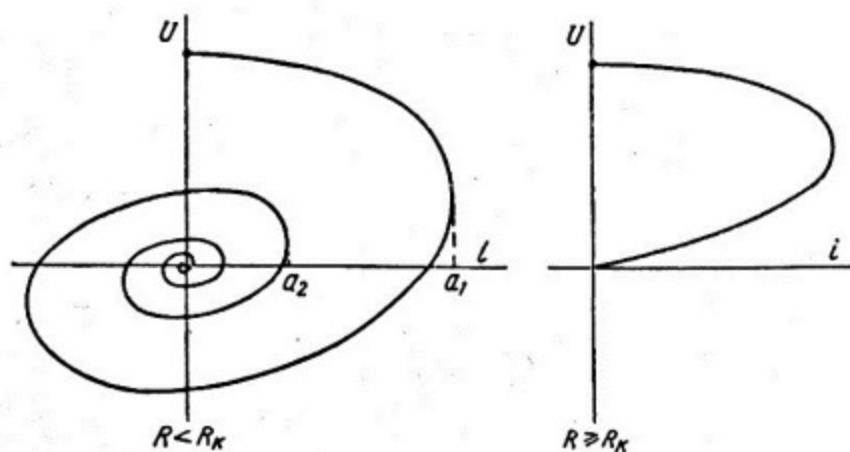


Рис. 11.4

выключить генератор развертки осциллографа. При этом на вертикальный вход осциллографа будет по-прежнему подаваться напряжение с конденсатора, а на горизонтальный —

напряжение с активного сопротивления R . Так как в активном сопротивлении напряжение находится в фазе с током, то тем самым мы получаем зависимость напряжения на конденсаторе от тока в контуре (рис. 11.4).

Задание

1. Собрать схему, согласно рис. 11.2, подсоединив клеммы β , γ , δ осциллографа к соответствующим точкам контура, которые обозначены теми же буквами.

2. Включить генератор развертки осциллографа и реле (последнее должно издавать характерное жужжание). Изменяя частоту генератора развертки, добиться получения на экране устойчивой осциллограммы (см. рис. 11.3).

3. Меняя L , C и R , проследить за характером изменения затухающих колебаний. В частности, провести наблюдение за переходом колебательного процесса в аperiodический.

4. Определить зависимость периода колебаний T от произведения LC при выведенном магазине сопротивлений. Рассчитать не менее пяти точек в диапазоне LC от 10 до 50 $\text{мгн} \cdot \text{мкф}$. Расчет T проводить по формуле

$$T_{\text{набл}} = 0,02 \frac{s_0}{S} \text{ сек},$$

где S и s_0 — интервалы на осциллограмме, показанные на рис. 11.3. Для большей точности следует измерить интервал ΔS , который содержит n интервалов s_0 , тогда $s_0 = \Delta S/n$.

Результаты измерений и расчетов занести в табл. 11.1.

Таблица 11.1

LC	$S, \text{ м.м}$	$\Delta S, \text{ м.м}$	n	s_0	$T_{\text{набл}}$	$T_{\text{теор}}$

Построить график $T_{\text{теор}}(LC)$ по формуле (11.7). На этот же график нанести опытные значения $T_{\text{теор}}$. Выяснить причину возможных расхождений.

5. Исследовать фазовые кривые. Для этого выключить генератор развертки осциллографа и проследить за характером изменения осциллограммы, меняя L , C и R .

6. Установив $L=100 \text{ мгн}$ и $C=0,1 \text{ мкф}$, определить с помощью фазовой кривой величину критического сопротивления R_k , при котором наступает аperiodический процесс (см. рис. 11.4). Для большей точности наблюдение вести при максимальном вертикальном и горизонтальном усилении осциллографа, а также при достаточно малой яркости и тща-

тельной факусировке. Полученный результат сравнить с теоретическим.

7. Определить по фазовым кривым при этих же значениях L и C зависимость логарифмического декремента затухания λ от R в диапазоне R от 100 до 600 ом (пять-шесть точек). Расчет проводить по формуле (11.9). Результаты измерений и расчетов занести в табл. 11.2.

Таблица 11.2

$R, \text{ом}$	$a_1, \text{мм}$	$a_2, \text{мм}$	$\lambda_{\text{табл}} = \ln \frac{a_1}{a_2}$

Построить график $\lambda = f(R)$.

З а м е ч а н и е. При сравнении экспериментальных данных с теоретическими необходимо иметь в виду, что кроме сопротивления магазина R в контуре имеется еще активное сопротивление в магазине индуктивностей R_L , которое при расчетах должно учитываться. Значения R_L указаны на установке.

Работа 12

ИЗУЧЕНИЕ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ И ИНДУКТИВНОСТИ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСА

ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуются вынужденные колебания в последовательном резонансном контуре, состоящем из последовательно включенных емкости C , индуктивности L ,

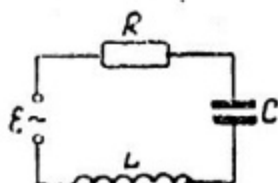


Рис. 12.1

активного сопротивления R и источника переменной электродвижущей силы \mathcal{E} (рис. 12.1). Такой контур называют контуром LCR . Положим, что внешняя э. д. с. изменяется по синусоидальному закону

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t. \quad (12.1)$$

В этом случае в контуре возникнут электрические колебания с частотой внешней э. д. с. Найдем уравнение, описывающее вынужденные колебания в контуре.

Напряжение на конденсаторе U_c равно

$$U_c = \frac{q}{C}, \quad (12.2)$$

где q — заряд конденсатора.

В части контура, обладающей индуктивностью L , возникает э. д. с. самоиндукции

$$\mathcal{E}_S = -L \frac{di}{dt}. \quad (12.3)$$

Ток в контуре связан с изменением заряда конденсатора соотношением

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (12.4)$$

Согласно второму правилу Кирхгофа

$$iR + U_C = \mathcal{E}_S + \mathcal{E}. \quad (12.5)$$

Подставив в уравнение (12.5) соотношения (12.1), (12.2), (12.3) и (12.4), получим

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = \mathcal{E}_m \sin \omega t. \quad (12.6)$$

Дифференцируя уравнение (12.6) по времени и используя (12.4), получаем дифференциальное уравнение, которому должен удовлетворять ток в контуре:

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \mathcal{E}_m \omega \cos \omega t. \quad (12.7)$$

Из теории вынужденных колебаний известно, что такое уравнение в случае установившихся колебаний имеет решение

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (12.8)$$

где

$$I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (12.9)$$

Сдвиг фаз φ между внешней э. д. с. и током в контуре определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (12.10)$$

Формулу (12.9), связывающую амплитудные значения тока и внешней э. д. с., называют законом Ома для переменного тока. Величину

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (12.11)$$

называют полным сопротивлением цепи.

Из формулы (12.9) следует, что при условии

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (12.12)$$

амплитуда тока достигает максимального значения — наблюдается явление резонанса.

Кривую зависимости амплитуды тока от частоты внешней э. д. с. называют резонансной кривой или резонансной характеристикой данного контура. На рис. 12.2 даны резонансные кривые при различных активных сопротивлениях контура. Чем меньше активное сопротивление

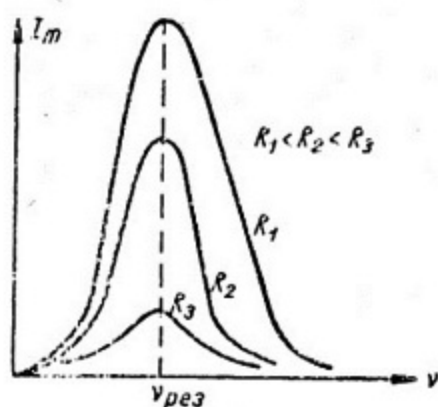


Рис. 12.2

контура R , тем больше амплитуда тока при резонансе и тем острее резонансная кривая.

Из формулы (12.12) следует, что резонансная частота контура определяется соотношением

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (12.13)$$

При резонансе амплитуда тока равна (12.9)

$$I_{m\text{рез}} = \frac{\mathcal{E}_m}{R}, \quad (12.14)$$

и сдвиг фаз между током и внешней э. д. с. равен нулю ($\varphi=0$) [см. формулу (12.10)].

С изменением частоты внешней э. д. с. изменяется напряжение на индуктивности и емкости. Напряжение на конденсаторе может быть определено на основании формул (12.2), (12.4) и (12.8):

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{\int idt}{C} = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t - \varphi),$$

или

$$U_C = U_{mc} \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right), \quad (12.15)$$

где

$$U_{mc} = \frac{I_m}{\omega C}.$$

Величину $R_c = \frac{1}{\omega C}$ называют емкостным сопротивлением.

Напряжение на конденсаторе отстает по фазе от тока на $\frac{\pi}{2}$.

Напряжение на индуктивности можно найти, применяя закон Ома для участка цепи:

$$U_L = ir - \mathcal{E}_S,$$

где r — активное сопротивление индуктивности, которое в данном случае считается равным нулю. Следовательно, используя формулы (12.3) и (12.8), получим

$$U_L = -\mathcal{E}_S = L \frac{di}{dt} = L\omega I_m \cos(\omega t - \varphi),$$

или

$$U_L = U_{mL} \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (12.16)$$

где

$$U_{mL} = I_m \omega L.$$

Величину $R_L = \omega L$ называют индуктивным сопротивлением. Напряжение на индуктивности опережает по фазе ток на $\frac{\pi}{2}$.

Напряжение на активном сопротивлении R равно

$$U_R = R \cdot i = I_m R \sin \omega t,$$

или

$$U_R = U_{mR} \sin \omega t, \quad (12.17)$$

где

$$U_{mR} = I_m R \sin \omega t.$$

Из формул (12.13), (12.15) и (12.16) следует, что при резонансе амплитудные значения U_{mC} и U_{mL} равны. Действительно:

$$U_{mC_{\text{рез}}} = R C I_{m_{\text{рез}}} = \frac{\mathcal{E}_m}{R \omega_{\text{рез}} C} = \mathcal{E}_m \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}};$$

$$U_{mL_{\text{рез}}} = R L I_{m_{\text{рез}}} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \omega_{\text{рез}} L = \mathcal{E}_m \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Величину $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ называют добротностью контура.

Напряжения на C и L сдвинуты по фазе на π [см. формулы (12.8), (12.15) и (12.16)]. Поэтому при резонансе сумма напряжений U_L и U_C равна нулю и напряжение на сопротивлении R равно внешней э. д. с.

На рис. 12.3, а показана векторная диаграмма напряжений в колебательном контуре, на которой отложены векторы амплитуд U_{mL} , U_{mC} , U_{mR} и \mathcal{E}_m с учетом сдвига фаз между

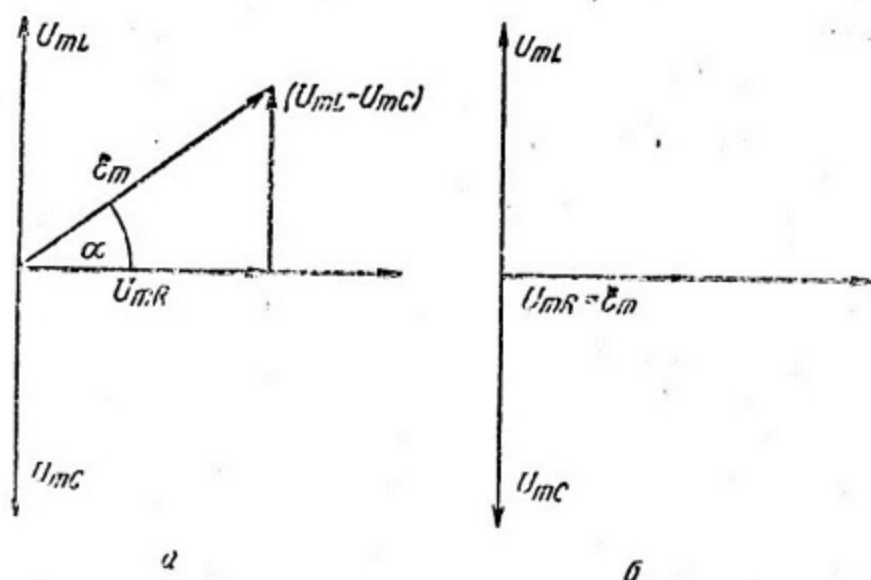


Рис. 12.3

ними. На рис. 12.3, б дана векторная диаграмма при резонансе.

Из анализа уравнения (12.15) с учетом (12.9) следует, что максимальное значение амплитуды напряжения на конденсаторе достигается при

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}},$$

т. е. при частотах меньше чем $\omega_{\text{рез}}$. Максимальное значение амплитуды напряжения на индуктивности достигается при частотах, несколько больших $\omega_{\text{рез}}$.

Итак, явление резонанса в последовательном резонансном контуре заключается в том, что при определенной частоте внешней э. д. с., равной $\omega = \omega_{\text{рез}}$, амплитуда тока в контуре достигает максимального значения. При резонансе полное сопротивление контура равно его активному сопротивлению R и сдвиг фаз между током и напряжением равен нулю. Контур действует как активное сопротивление.

В момент резонанса амплитудные значения напряжения на индуктивности и емкости равны и достигают значения, которое может быть больше амплитудного значения внешней э. д. с. ($Q > 1$). Поэтому явление резонанса в последовательном контуре называют резонансом напряжений.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) звуковой генератор, 2) ламповый вольтметр или два вольтметра выпрямительной (детекторной) системы, 3) магазин сопротивлений, 4) магазин емкостей, 5) магазин индуктивностей, 6) миллиамперметр выпрямительной системы, 7) неизвестная емкость, 8) неизвестная индуктивность.

Исследование явления резонанса напряжений проводится на схеме, показанной на рис. 12.4. Источником синусоидального напряжения является звуковой генератор, дающий э. д. с.

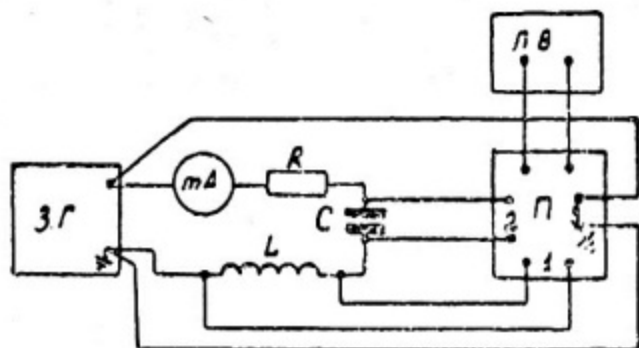


Рис. 12.4

с частотой от 20 до 20 000 гц. В качестве R , L и C используются соответствующие магазины, а также могут быть использованы катушки индуктивностей и отдельные конденсаторы. Ток и напряжение на L и C измеряются приборами, пригодными для работы на звуковых частотах.

Для измерения напряжений в данной работе использован ламповый вольтметр ВК7-7. Правила работы с ним даны в приложении. Ламповым вольтметром определяют напряжение на L и C , а также напряжение на выходных клеммах звукового генератора. Для удобства соединения вольтметра с этими участками схемы используется специальный переключатель П, с которым постоянно соединен пробник вольтметра.

Схема должна быть собрана так, чтобы клемма «Земля» звукового генератора обязательно была соединена с клеммой «Земля» на переключателе П.

Необходимо помнить, что приборы показывают действующие значения тока и напряжения, которые связаны с амплитудным значением следующими соотношениями:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \text{ и } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} .$$

Для того чтобы резонансная кривая была исследована в достаточно широком интервале, необходимо подобрать пара-

метры схемы так, чтобы резонансная частота находилась примерно на середине частотного лимба генератора.

Если в контуре LCR один из параметров (L или C) неизвестен, то, сняв резонансную характеристику контура, определяют по ней резонансную частоту $\nu_{рез}$ и из соотношения

$$\nu_{рез} = \frac{\omega_{рез}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (12.18)$$

определяют неизвестную величину.

Следовательно, схема на рис. 12.4 может быть использована для определения неизвестной индуктивности или неизвестной емкости.

Задание

1. Собрать схему согласно рис. 12.4.
2. Снять резонансные кривые.

Перед началом измерений необходимо согласовать с преподавателем значение частоты $\nu_{рез}$, на которую должен быть настроен колебательный контур. По формуле (12.13) вычислить произведение LC . Установить на магазинах емкости и индуктивности соответствующие L и C и при выключенном магазине сопротивлений R экспериментально убедиться в том, что при заданном $\nu_{рез}$ в контуре наблюдается резонанс. Подобрать $R_{вых}$ звукового генератора так, чтобы резонанс был наиболее острым. После этого можно приступить к снятию кривых.

Резонансные кривые снимаются при двух значениях активного сопротивления R . Рекомендуется провести измерения при выключенном магазине сопротивлений и при R , для которого амплитуда тока при резонансе примерно в два раза меньше максимального значения амплитуды тока, полученного в первом случае. Плавно изменяя частоту э. д. с., даваемую генератором, для каждого значения ν измерить и записать ток и напряжение на емкости и индуктивности. Вдали от резонанса измерения можно производить с большим интервалом по частоте. Вблизи резонанса в области крутого подъема и спада кривой измерения следует делать достаточно часто. При всех измерениях амплитудное значение внешней э. д. с. должно оставаться постоянным, поэтому необходимо провести все измерения при одном и том же показании вольтметра генератора звуковых частот.

Результаты измерений занести в табл. 12.1.

3. Построить кривые $I = I(\nu)$; обе кривые, соответствующие разным значениям R , построить на одном графике. Определить по графику $\nu_{рез}$ и сравнить с теоретическим значением.

Таблица 12.1.

$\mathcal{E}, \text{ в}$	$\nu, \text{ гц}$	$i, \text{ ма}$	$U_C, \text{ в}$	$U_L, \text{ в}$

4. Построить кривые $U_C = U_C(\nu)$ и $U_L = U_L(\nu)$. Кривые, соответствующие одному и тому же значению R , строятся на одном графике.

5. Измерить неизвестную индуктивность L_x .

Неизвестную индуктивность включают в схему вместо известной индуктивности L и выключают сопротивление R . На опыте определяют $\nu_{\text{рез}}$ и снимают резонансную кривую (только вблизи резонанса). Строят график $I = I(\nu)$ и по нему определяют точное значение $\nu_{\text{рез}}$. По формуле (12.18) вычисляют L_x .

6. Измерить неизвестную емкость C_x .

Вместо известной емкости C в схему включают неизвестную емкость C_x . Порядок измерений такой же, как и в пункте 5.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ВОЛЬТОММЕТР ЛАМПОВЫЙ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ВК7-7

(правила работы с прибором)

Вольтометр ламповый универсальный типа ВК7-7 представляет собой переносный лабораторный прибор, предназначенный для измерения напряжений постоянного и переменного тока и омических сопротивлений.

На рис. 12.5 показана передняя панель вольтометра, на которой расположены шкала и ручки управления.

Подготовка к измерениям

Перед включением вольтометра в сеть, во избежание зашкаливания стрелки прибора, необходимо установить переключатель рода работ на «+» и переключатель пределов измерения на 150 в. Затем подключить кабель питания в сеть переменного тока напряжением 220 в и тумблером включить прибор; при этом загорается лампочка. После 20-минутного прогрева прибор готов к измерениям.

Примечание. Если стрелка прибора не стоит на нуле, пригласить лаборанта.

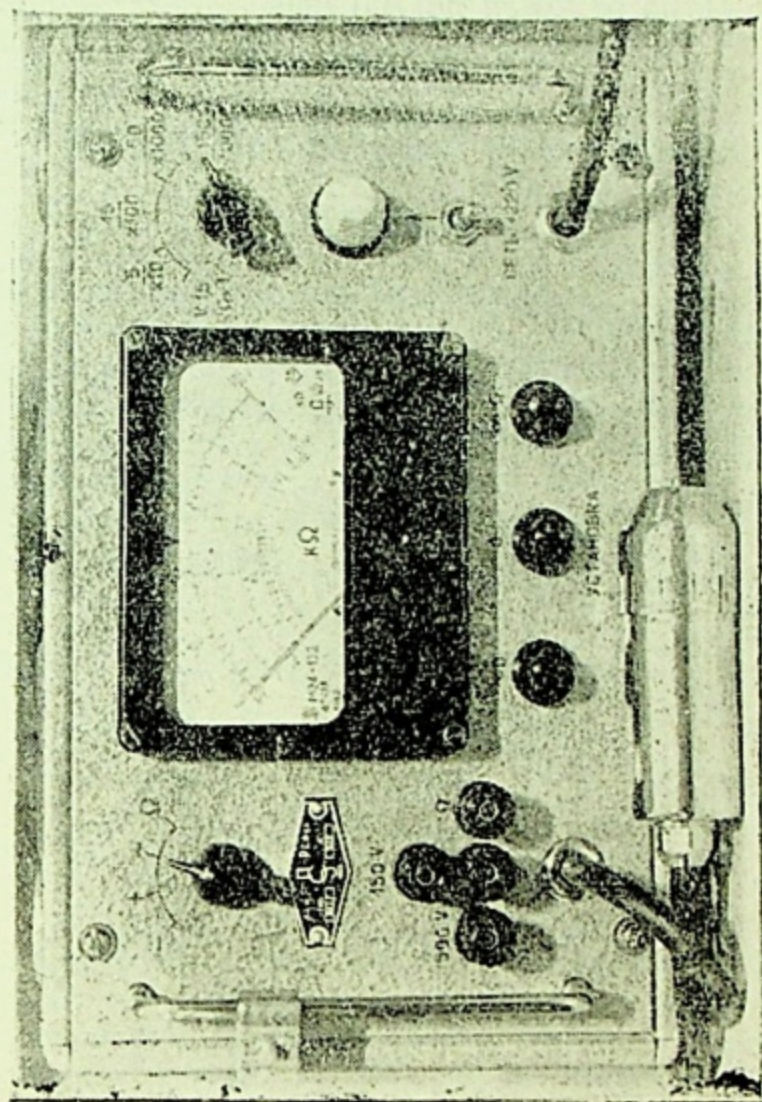


Рис. 125

Измерения

При измерении переменного напряжения переключатель рода работ должен быть поставлен в положение «~». Выносной пробник подключается к измеряемому напряжению. Положение переключателя пределов измерения устанавливать в зависимости от величины измеряемого напряжения.

Вольтомметр измеряет напряжения переменного тока до 150 в на пяти пределах: 1,5; 5; 15; 50; 150 в. Частотный диапазон вольтомметра от 20 гц до 700 мгц.

Работа 13

РЕЛАКСАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

ВВЕДЕНИЕ

Работа дает возможность ознакомиться с принципом действия простейшей автоколебательной системы, возбуждающей релаксационные колебания — генератором с неоновой лампой. Принципиальная схема генератора дана на рис. 13.1. Основными элементами схемы являются контур RC , содержащий сопротивление R и емкость C , и неоновая лампа N .

Работа схемы существенно зависит от свойств неоновой лампы. Неоновая лампа — газоразрядный прибор, конструк-

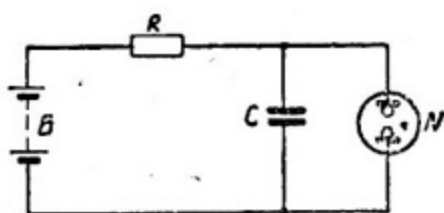


Рис. 13.1

тивно выполненный в виде двух параллельных или коаксиальных электродов, помещенных в баллон, наполненный неоном при небольшом давлении. Характерной особенностью неоновой лампы является то, что она начинает проводить ток («зажигается») только при определенном напряжении «напряжении зажигания» U_z , которое зависит от расстояния между электродами, формы их и от давления газа, и гаснет при существенно меньшем «напряжении гашения» U_r . Вольт-амперная характеристика неоновой лампы изображена на рис. 13.2. При малых напряжениях на электродах ток через лампу равен нулю. При достижении напряжения зажигания в лампе возникает разряд и ток скачком достигает конечной величины. При дальнейшем увеличении напряжения ток в лампе возрастает. Если уменьшать напряжение, то спадание

тока идет по другой кривой (близкой к первой) и лишь при достижении напряжения гашения U_r , которое меньше U_3 , ток через лампу скачком падает до нуля и лампа гаснет. Для упрощения пользуются идеализированной характеристикой неоновой лампы, представленной отрезком прямой линии

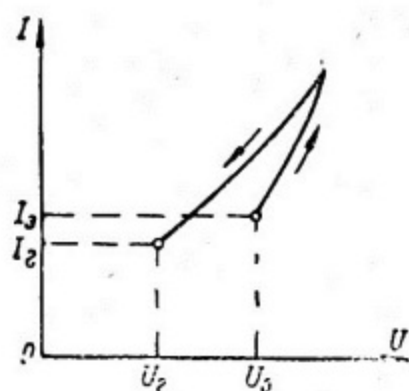


Рис. 13.2

на рис. 13.3. В соответствии с этой характеристикой внутреннее сопротивление лампы R_i является разрывной функцией U . При возрастании U от 0 до U_3 сопротивление лампы равно бесконечности ($R_i = \infty$). В области значений $U > U_2$ сопротивление лампы имеет конечное постоянное значение, численно равное $\operatorname{ctg} \alpha$ (см. рис. 13.3). При уменьшении напряжения R_i остается постоянным до $U = U_r$, при $U < U_r$ становится равным бесконечности ($R_i = \infty$). Таким

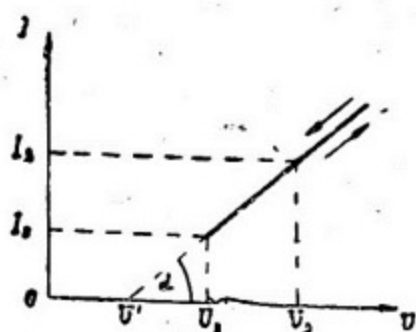


Рис. 13.3

образом, при зажигании и гашении лампы ее сопротивление меняется скачком, принимая значение $R_i = \infty$ или $R_i = \operatorname{const}$.

Рассмотренные свойства неоновой лампы объясняют механизм возникновения колебаний в схеме, приведенной на рис. 13.1. Для того чтобы неоновая лампа могла вспыхнуть, напряжение на источнике тока U_0 должно быть больше U_3 . При замыкании цепи вначале происходит зарядка конденса-

тора (неоновая лампа не горит). Закон изменения напряжения на конденсаторе U при его зарядке можно найти, применив второе правило Кирхгофа к контуру RC :

$$iR + U = U_0.$$

Подставляя в это уравнение известные соотношения:

$$i = \frac{dq}{dt} \text{ и } U = \frac{q}{C},$$

получаем

$$RC \frac{dU}{dt} + U = U_0,$$

Решение, удовлетворяющее начальному условию $U=0$ при $t=0$, будет

$$U = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right). \quad (13.1)$$

Величину RC называют постоянной времени цепи RC .

Как видно из формулы (13.1), напряжение U растет и стремится асимптотически к значению U_0 (кривая OA рис. 13.4). Но раньше, чем U достигнет значения U_0 , лампа

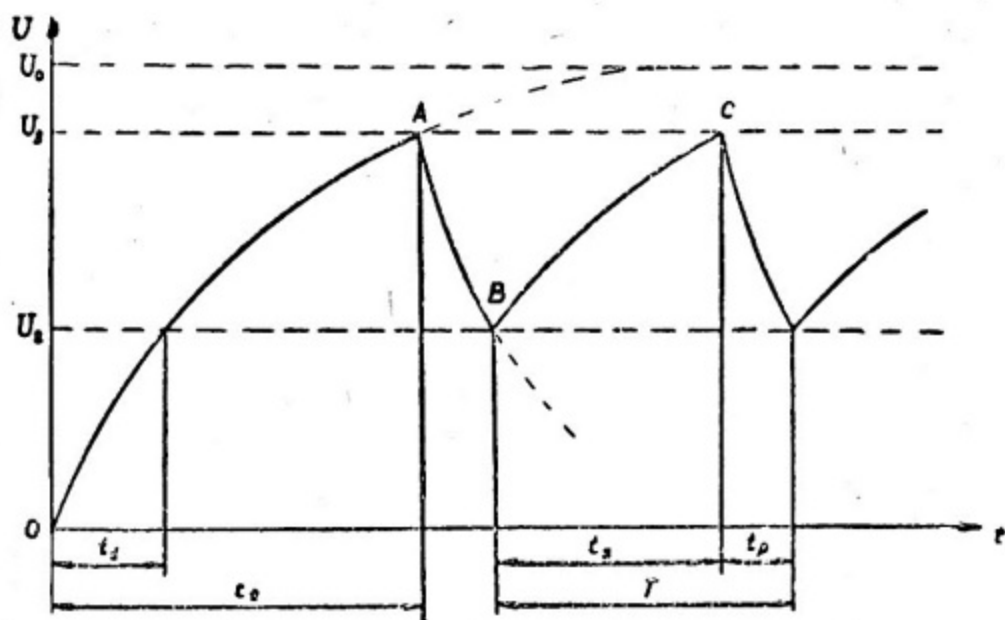


Рис. 13.4

зажжется. Вспышка лампы происходит при $U=U_1$, при этом ее сопротивление меняется скачком от $R_l = \infty$ до $R_l = \text{const}$.

Если R настолько велико, что ток, подводимый от источника, значительно меньше разрядного тока через лампу, то конденсатор разряжается (кривая AB).

В тот момент, когда U станет равным U_r , лампа погаснет, и конденсатор снова начнет заряжаться. Напряжение на нем растет по кривой BC (см. рис. 13.4). Как только U станет равным U_0 , лампа снова вспыхнет. Далее процесс будет периодически повторяться.

Следовательно, в схеме возбуждаются колебания, состоящие из двух аперриодических процессов: процесса зарядки конденсатора через большое сопротивление (процесса относительно медленного накопления энергии) и процесса разрядки конденсатора через малое сопротивление — неоновую лампу (процесса относительно быстрого рассеяния энергии). По форме колебания близки к пилообразным. Такие автоколебания, резко отличающиеся от синусоидальных, называют релаксационными.

Рассмотрим условия возбуждения колебаний. Для того чтобы в схеме устанавливались колебания, необходимо, чтобы после возникновения разряда (вспышки), ток через лампу шел главным образом за счет разрядки конденсатора. Напряжение на конденсаторе будет падать, и когда достигнет U_r , лампа погаснет. Конденсатор вновь начинает заряжаться, и процесс повторяется. Для этого нужно, чтобы сила тока I , притекающего в схему от источника тока в момент, когда напряжение на обкладках конденсатора U_r , была бы меньше, чем наименьшая сила тока I_r через лампу, когда она еще горит.

Из схемы рис. 13.1 и идеализированной характеристики неоновой лампы (см. рис. 13.3) получаем:

$$I = \frac{U_0 - U_r}{R} \quad \text{и} \quad I_r = \frac{U_r - U'}{R_l}.$$

Таким образом, условие самовозбуждения колебаний можно записать в виде следующего неравенства:

$$\frac{U_0 - U_r}{R} < \frac{U_r - U'}{R_l}.$$

Из неравенства следует, что для возникновения колебаний необходимо, чтобы при данном U_0 сопротивление R было больше чем $R_{кр} = \frac{U_0 - U_r}{U_r - U'} R_l$, и, наоборот, при данном R напряжение U_0 было меньше определенной величины (но, конечно, не меньше U_3). Если указанные условия не выполняются, то колебания срываются.

Определим период релаксационных колебаний. Период колебаний T складывается из времени зарядки конденсатора t_3 и времени его разрядки t_p :

$$T = t_3 + t_p.$$

Время зарядки конденсатора в процессе колебаний может быть определено как

$$t_3 = t_2 - t_1,$$

где t_2 — время зарядки конденсатора до напряжения U_3 ; t_1 — время зарядки конденсатора до напряжения U_r (рис. 13.4). Значения t_2 и t_1 могут быть определены по формуле (13.1):

$$U_3 = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{RC}} \right),$$

$$U_r = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{RC}} \right),$$

откуда:

$$t_2 = -RC \ln \frac{U_0 - U_3}{U_0};$$

$$t_1 = -RC \ln \frac{U_0 - U_r}{U_0}.$$

Следовательно:

$$t_3 = t_2 - t_1 = RC \ln \frac{U_0 - U_r}{U_0 - U_3}.$$

Обычно выбирают сопротивление R достаточно большим ($R \gg R_l$). В этом случае t_p будет много меньше t_3 , поэтому

$$T \approx t_3 = RC \ln \frac{U_0 - U_r}{U_0 - U_3}. \quad (13.2)$$

Из формулы (13.2) следует, что период колебаний пропорционален постоянной времени RC .

Задание

1. Определение потенциала зажигания и потенциала гашения неоновой лампы

Необходимые приборы: 1) неоновая лампа, 2) выпрямитель на 300 в, 3) вольтметр, 4) потенциометр, 5) ключ.

Собрать схему, изображенную на рис. 13.5. Изменяя передвижением движка потенциометра напряжение на лампе, по

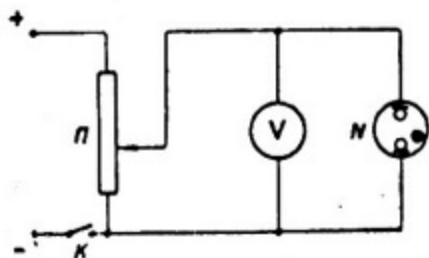


Рис. 13.5

вольтметру V определить напряжение в моменты зажигания и гашения лампы. В момент зажигания стрелка скачком отклоняется в сторону уменьшения напряжения; в момент гашения стрелка скачком несколько переходит в сторону, соответствующую росту напряжения (объясните, почему это происходит).

-Итак, U_3 — максимальное напряжение перед моментом зажигания лампы, после зажигания лампы напряжение на ней падает; U_r — минимальное напряжение перед моментом гашения лампы, после гашения напряжение на лампе возрастает.

Измерения произвести не менее пяти раз. Определить среднее значение U_3 и U_r .

2. Наблюдение формы релаксационных колебаний и исследование зависимости частоты колебаний от R , C и U_0

Необходимые приборы: 1) неоновая лампа, 2) магазин емкостей, 3) магазин сопротивлений (до 200 ком), 4) потенциометр, 5) выпрямитель на 300 в, 6) вольтметр, 7) осциллограф, 8) звуковой генератор, 9) переключатель, 10) ключи.

Схема работы показана на рис. 13.6. Емкость C берется в пределах 0,01—0,1 мкф, а сопротивление R —0,1—0,2 мом.

Примечание. В связи с тем, что в лаборатории минус источника тока заземлен, полярность при монтаже должна соблюдаться строго по схеме: узел проводов, подключаемых к минусу источника, присоединяется к клеммам «Земля» осциллографа и звукового генератора.

Исследование формы колебаний (зависимости напряжения от времени) производится на электронном осциллографе, для этого на Y -вход осциллографа подается напряжение с неоновой

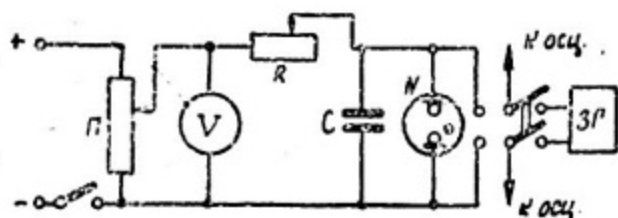


Рис. 13.6

вой лампы. Частоту развертки осциллографа подбирают так, чтобы осциллограмма казалась неподвижной. Звуковой генератор служит для точного определения периода исследуемых колебаний. С помощью переключателя к Y -входу осциллографа вместо неоновой лампы подключают звуковой генератор. Плавно изменяя частоту звукового генератора, добиваются, чтобы на стабильной осциллограмме число циклов

синусоид колебаний от 3Γ равнялось числу циклов разрывных колебаний от исследуемого генератора при фиксированной частоте развертки осциллографа. В этом случае частота исследуемых разрывных колебаний равна частоте звукового генератора.

а) Наблюдение формы релаксационных колебаний и исследование зависимости $\nu = f(U_0)$ при фиксированных значениях R и C

Собрать схему, данную на рис. 13.6. Величины емкости C и сопротивления R устанавливаются произвольно в указанных выше пределах. Включить питание схемы и установить напряжение U_0 несколько выше U_3 ; при этом должна начаться генерация. Частоту развертки осциллографа подобрать так, чтобы на экране наблюдались 1—3 периода пилообразных колебаний. Зарисовать или сфотографировать полученную осциллограмму. Далее, постепенно увеличивая напряжение U_0 , наблюдают на экране осциллографа за изменением периода и формы разрывных колебаний. Увеличивая напряжение U_0 , останавливаются каждый раз тогда, когда на экране осциллографа получается устойчивая картина. Частота развертки осциллографа сохраняется неизменной. Полученные осциллограммы зарисовать или сфотографировать. Сделать качественные выводы о зависимости частоты и формы кривой от U_0 .

После этих наблюдений произвести измерения частот колебаний при различных значениях U_0 до напряжения, при котором колебания срываются. Напряжение менять с интервалом 1—2 в. При этом частоту развертки осциллографа каждый раз подбирать так, чтобы на экране осциллографа наблюдались 1—3 периода пилообразных колебаний. Измерение частот производить с помощью 3Γ , как указано выше. Результаты измерений записать. По полученным данным построить график $\nu = \nu(U_0)$.

б) Исследование зависимости частоты релаксационных колебаний от R и C

1) Исследование зависимости $\nu(C)$ при фиксированных U_0 и R .

Величина сопротивления R устанавливается произвольно в указанных выше пределах, напряжение U_0 несколько выше U_3 ; R и U_0 сохраняются неизменными во время опыта. Измерить частоту колебаний при трех различных значениях емкости. Результаты измерений записать и сделать вывод о зависимости частоты колебаний от емкости C .

2) Исследование $\nu(R)$ при фиксированных U_0 и C .

Величина C выбирается в указанных выше пределах. На-

пряжение U_0 несколько больше U_3 ; C и U сохраняются неизменными во время опыта.

Измерить частоту колебаний при трех различных сопротивлениях. Результаты измерений записать и сделать вывод о зависимости частоты колебаний от сопротивления R .

3) По формуле (13.2) подсчитать период колебаний для двух-трех пар значений R , C при фиксированном U_0 и сравнить с экспериментальными данными.

Примечание. Количественные сравнения теории с опытом обнаруживают довольно значительные расхождения при сохранении порядка величины. Это объясняется, прежде всего, тем, что U_T и U_3 определены для случая статического режима. В действительности U_T и U_3 зависят не только от свойства лампы, но и от скорости изменения напряжения на ее электродах. Не менее существенным фактором является наличие паразитных емкостей и индуктивностей в цепях реальной схемы, которые не учтены теорией.

3. Применение генератора разрывных колебаний в качестве генератора развертки

Исследуемый генератор включается в осциллограф в качестве генератора развертки, для чего напряжение с неоновой лампы подается на X-вход осциллографа, генератор развертки осциллографа при этом выключается. На Y-вход осциллографа подается напряжение со звукового генератора. Генерируемые им колебания будут разворачиваться на экране осциллографа исследуемым генератором. Изменения частоты развертки производятся путем изменения U_0 при фиксированных значениях R и C .

Наблюдения произвести для трех частот развертки, соответствующие трем различным значениям напряжения U_0 : 1) несколько выше напряжения зажигания U_3 , 2) вблизи напряжения, при котором колебания срываются, и 3) каком-либо промежуточном значении U_0 .

Включив питание схемы и поочередно установив каждое из указанных напряжений (значение напряжения записать), добиться стабильной осциллограммы, состоящей из 2—3 циклов синусоид путем плавного изменения частоты звукового генератора. Наблюдаемые кривые зарисовать или сфотографировать.

Для объяснения характера полученных осциллограмм произвести наблюдения формы релаксационных колебаний для трех вышеуказанных напряжений (задание 2, пункт а). Частоту развертки осциллографа подбирать так, чтобы на экране наблюдался лишь один период пилообразных колебаний.

Сопоставив формы разворачивающихся пилообразных напряжений с соответствующими им осциллограммами колебаний звукового генератора, объяснить, почему с повышением U_0 последние меньше искажаются.

Работа 14

ЯВЛЕНИЕ ХОЛЛА В МЕТАЛЛАХ

ВВЕДЕНИЕ

Если пропустить через металлическую пластину ток и поместить ее в магнитное поле, как это показано на рис. 14.1, то в пластине возникает поперечная разность потенциалов, которая называется разностью потенциалов Холла.

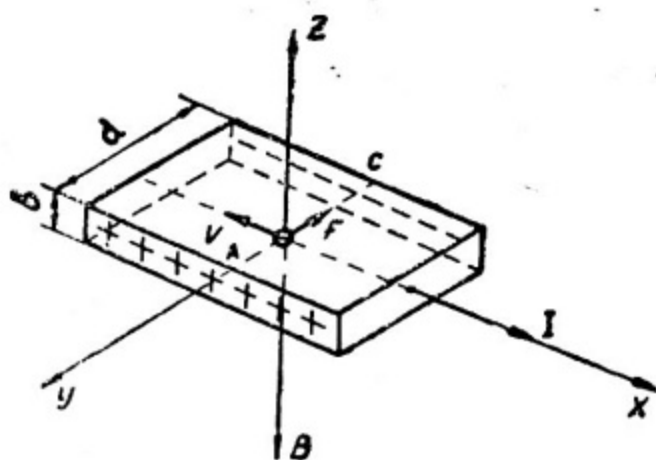


Рис. 14.1

Возникновение этой разности потенциалов обусловлено тем, что на свободные электроны, являющиеся носителями тока в металлах, в магнитном поле действует сила Лоренца

$$F = e[\mathbf{u}\mathbf{B}],$$

где \mathbf{B} — вектор магнитной индукции; e — заряд электрона; \mathbf{u} — скорость направленного движения электронов.

Эта сила отклоняет носители тока в направлении оси Y (см. рис. 14.1), в результате чего на боковых поверхностях

пластины образуются заряды. Накопление зарядов происходит до тех пор, пока сила электростатического взаимодействия не уравновесит силу Лоренца

$$e\mathbf{E} + e[\mathbf{u}\mathbf{B}] = 0. \quad (14.1)$$

Таким образом, напряженность поперечного электрического поля равна

$$\mathbf{E} = -[\mathbf{u}\mathbf{B}].$$

Если векторы \mathbf{u} и \mathbf{B} взаимно перпендикулярны, то напряженность поперечного поля равна по абсолютной величине $E = uB$, что соответствует поперечной разности потенциалов

$$U = Ed = uBd. \quad (14.2)$$

Средняя скорость направленного движения электронов u связана с плотностью тока j соотношением

$$j = neu, \quad (14.3)$$

где n — концентрация электронов.

Если ширина пластины d и ее толщина b , то плотность тока в пластине равна

$$j = \frac{I}{bd}, \quad (14.4)$$

где I — сила тока, текущего через пластину.

Используя соотношения (14.2) (14.3) и (14.4), можно представить поперечную разность потенциалов U в следующем виде:

$$U = R \frac{IB}{b}, \quad (14.5)$$

где

$$R = \frac{1}{en}. \quad (14.6)$$

Коэффициент R называют постоянной Холла. Соотношение (14.5) позволяет определить постоянную Холла R из опытных данных:

$$R = \frac{Ub}{IB} \text{ м}^3/\kappa \quad (14.7)$$

По формуле (14.6) может быть вычислена концентрация носителей тока в образце (в данном случае электронов).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) электромагнит, 2) зеркальный гальванометр, 3) амперметр, 4) аккумулятор, 5) магазин сопротивлений, 6) реостаты, 7) ключи.

Схема установки показана на рис. 14.2. Образец, представляющий собой медную фольгу, закреплен в специальном держателе, позволяющем вводить его в магнитное поле электромагнита. Ток через образец регулируется реостатом R_T . Сила тока не должна превышать допустимого значения. Кроме того, во избежание разогрева образца рекомендуется

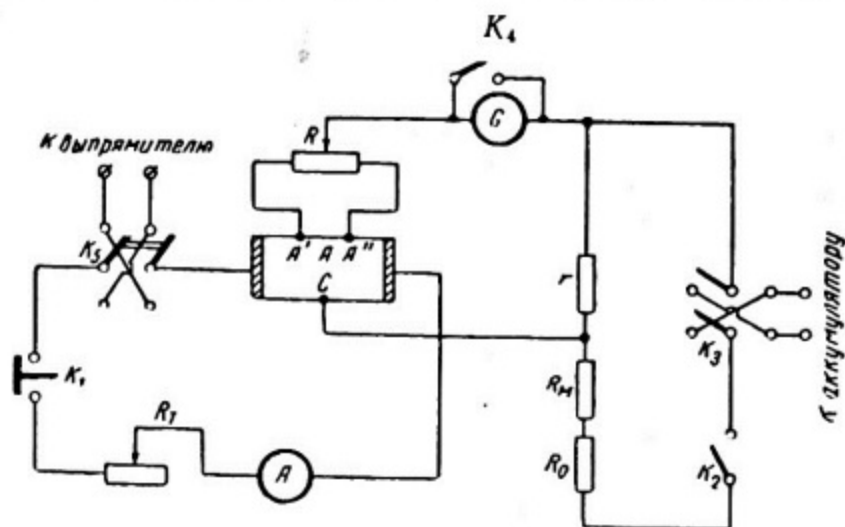


Рис. 14.2

кратковременно включать ток с помощью кнопочного выключателя K_1 .

Электромагнит питается от выпрямителя. В цепь включены реостат и амперметр, что дает возможность устанавливать ток, текущий через электромагнит. Магнитное поле в зазоре электромагнита определяется по силе тока, протекающего через его обмотку, с помощью градуировочного графика, прилегаемого к работе.

Поперечная разность потенциалов U должна была бы измеряться между точками A и C образца. Однако даже при отсутствии магнитного поля между этими точками при пропускании тока через образец наблюдалась бы разность потенциалов, обусловленная некоторой асимметрией расположения соответствующих электродов. Поэтому, как показано на рис. 14.2, соединение выполнено с помощью трех электродов A' , A'' и C . Средняя точка участка A' и A'' , лежащая на одной эквипотенциали с точкой C , определяется следующим способом. Перед началом измерений, т. е. перед тем как вводить образец в магнитное поле, включают ток через образец (ключ компенсационной схемы K_2 должен быть разомкнут). При наличии асимметрии в расположении электродов возникает разность потенциалов, и гальванометр G дает отклонение. Подбирают такое положение потенциометра R , при котором через гальванометр не идет ток («зайчик»

гальванометра возвращается на нуль). В таком положении схема готова к измерениям.

Измерение поперечной разности потенциалов производят методом компенсации. Образец вводят в магнитное поле и включают ток через образец. Замыкают ключ K_2 и подбирают такое сопротивление на магазине R_m , при котором ток через гальванометр G не идет. В этом случае падение напряжения U' на сопротивлении r полностью компенсирует поперечную разность потенциалов U . Согласно закону Ома

$$U' = \frac{\mathcal{E}}{r + R_m + R_0} \cdot r, \quad (14.8)$$

где \mathcal{E} — э. д. с. батареи B ; R_m — сопротивление магазина; r — компенсационное сопротивление порядка 10^{-2} ом; R_0 — блокировочное сопротивление порядка 10 ом.

Неизвестная поперечная разность потенциалов U численно равна измеренному значению U' .

При изменении направления B или тока I на обратное меняется знак поперечной разности потенциалов. Этим обстоятельством пользуются для того, чтобы отличить явление Холла от других явлений, которые могут привести к возникновению разности потенциалов в образце (например, т. э. д. с.).

Задание

1. В соответствии со схемой на рис. 14.2 присоединить магазин, аккумулятор, ключ и гальванометр. При всех подготовительных операциях гальванометр должен быть шунтирован, т. е. ключ K_4 замкнут, а ключ компенсационной схемы K_2 разомкнут.

2. Подготовить установку к измерениям. Для этого вывести держатель с образцом из зазора магнита, установить ток в цепи образца и с помощью потенциометра R произвести компенсацию разности потенциалов между электродами, вызванную асимметрией их расположения. Выключить ток через образец.

3. Включить ток в цепи обмотки электромагнита и установить наибольшую возможную силу тока. По градуировочному графику определить магнитное поле в зазоре электромагнита.

4. Ввести образец в зазор электромагнита. Разомкнуть ключ шунта гальванометра K_4 . Убедиться, что показания гальванометра не изменились. При некотором (небольшом) смещении «зайчика» вернуть его на нуль с помощью потенциометра R .

5. Включить ток через образец. Замкнуть ключ компенсационной схемы. Подбором сопротивления магазина R_m вернуть «зайчик» к нулевому делению.

6. По формуле (14.8) рассчитать поперечную разность потенциалов Холла.

7. Повторить измерение U для нескольких значений силы тока, протекающего через образец. При каждом новом значении I производить подготовку к измерениям, указанную в пункте 2. Полученные данные записать в таблицу.

8. Изменить с помощью ключа K_5 направление тока через образец и измерить U для тех же значений I , что и в пункте 7.

9. Построить график $U=U(I)$ и определить по нему среднее значение отношения U/I .

10. Вычислить постоянную Холла для меди и концентрацию электронов в меди.

Работа 15

ЯВЛЕНИЕ ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Как было указано в предыдущей работе, явление Холла заключается в появлении поперечной разности потенциалов в металлической или в полупроводниковой пластине, помещенной в магнитное поле. Возникновение разности потенциалов вызвано тем, что на заряды, движением которых обусловлен ток, в магнитном поле действует сила, отклоняющая их в направлении, перпендикулярном полю. Теория явления подробно рассмотрена в работе 14. Поперечная разность потенциалов между точками *A* и *C* пластины (см. рис. 14.1) равна

$$U = R \frac{IB}{b}, \quad (15.1)$$

где *I* — сила тока в пластине; *b* — толщина пластины; *B* — магнитная индукция поля. Если учесть статистическое распределение носителей тока по скоростям в полупроводнике, то для постоянной Холла вместо формулы (14.6) получается более точное выражение

$$R = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{en},$$

где *e* — заряд носителей тока; *n* — их концентрация.

Определив величину и знак постоянной Холла, можно найти концентрацию носителей тока в полупроводнике и их знак.

В работе определяется постоянная Холла в образцах германия *n*- и *p*-типа. Германий является электронным полупроводником. В таких полупроводниках возможна проводимость двух типов: электронная и дырочная. Чтобы это понять, рассмотрим структуру германия. Германий имеет 4 валентных электрона. В кристалле германия эти валентные электроны образуют парные, так называемые ковалентные связи. В результате каждый атом в решетке германия оказывается связанным с четырьмя ближайшими атомами (решетка типа алмаза).

Следует подчеркнуть, что ковалентная, или парно-электронная, связь существенно отличается от металлической связи. Если в металле электроны образуют так называемый электронный газ, то в германии электроны являются структурными электронами, связывающими кристалл в одно целое. В этом заключена возможность различного механизма проводимости. Будем условно изображать кристаллическую решетку германия в двумерном пространстве так, как показано на рис. 15.1.

Если один из атомов германия в решетке заменить атомом P, Al или другого пятивалентного элемента, то четыре из пяти валентных электрона пойдут на образование ковалентной связи с соседними атомами германия, а пятый электрон оказывается связанным со своим атомом гораздо слабее и может легко отщепиться за счет энергии теплового движения и получить возможность перемещаться по кристаллу (рис. 15.2). Нужно отметить, что кристалл при этом остается нейтральным. Возникающий таким образом тип проводимости называется электронной проводимостью.

Пятивалентные примесные атомы называются донорами, поскольку они отдают избыточный электрон кристаллу. Германий, содержащий донорные примеси, называется германием *n*-типа.

С другой стороны, если вместо атома германия в решетке помещен атом какого-либо трехвалентного элемента такого, как В или In, то для обеспечения ковалентной связи со своими соседями трехвалентному атому недостает одного электрона (рис. 15.3). Таким образом, в одной из связей образуется дырка. Эта дырка может быть заполнена электроном из соседних связей, где при этом в свою очередь образуется дырка. Следовательно, возникает возможность перемещения дырки по кристаллу и участия ее в механизме проводимости. Движение дырок эквивалентно движению положительных зарядов. Такой тип проводимости называют дырочной проводимостью.

Трехвалентные примесные атомы называются акцепторами, поскольку они захватывают электроны из других связей, создавая тем самым дырку. Германий, содержащий акцепторные примеси, называют германием *p*-типа.

Изучение эффекта Холла на полупроводниках позволяет определить целый ряд важнейших характеристик вещества. Во-первых, как уже было сказано выше, определив постоянную Холла, можно определить концентрацию носителей тока. Учитывая то обстоятельство, что при комнатной температуре в германии почти все примеси ионизованы, величину концентрации носителей тока можно считать равной концентрации примесей доноров или акцепторов.

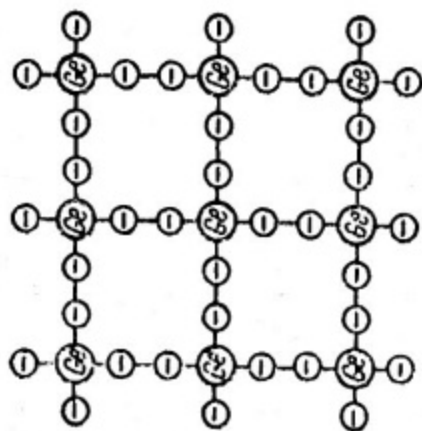


FIG. 15.1

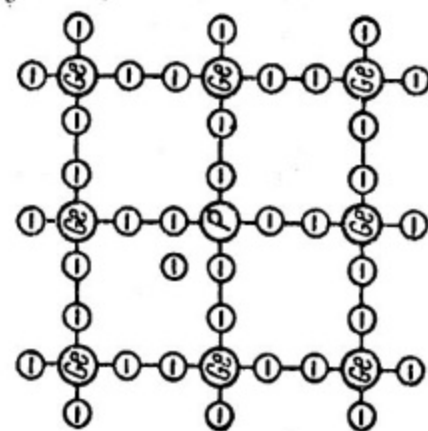


FIG. 15.2

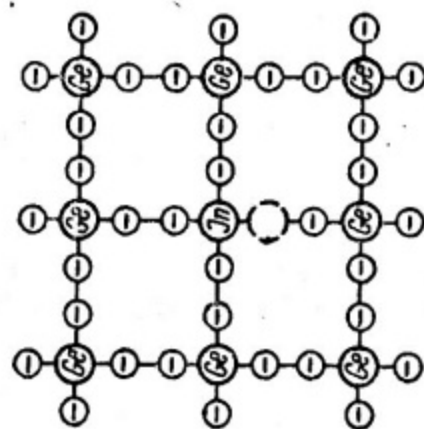


FIG. 15.3

Во-вторых, кроме концентрации носителей можно по знаку эффекта Холла определить тип проводимости. Дело в том, что в магнитном поле дырки будут отклоняться в ту же сторону, что и электроны, так как в выражении (15.1) знак изменится дважды: при изменении знака скорости и при изменении знака заряда для дырок. Таким образом, эффект Холла в электронном и дырочном германии будет иметь различные знаки.

Интересно заметить, что, зная постоянную Холла и, следовательно, концентрацию носителей тока и измерив проводимость того же образца, можно определить подвижность носителей тока, которая также является важной характеристикой полупроводников.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) электромагнит, 2) потенциометр ПП, 3) амперметр, 4) миллиамперметр, 5) аккумулятор, 6) два переключателя, 7) реостаты, 8) ключ.

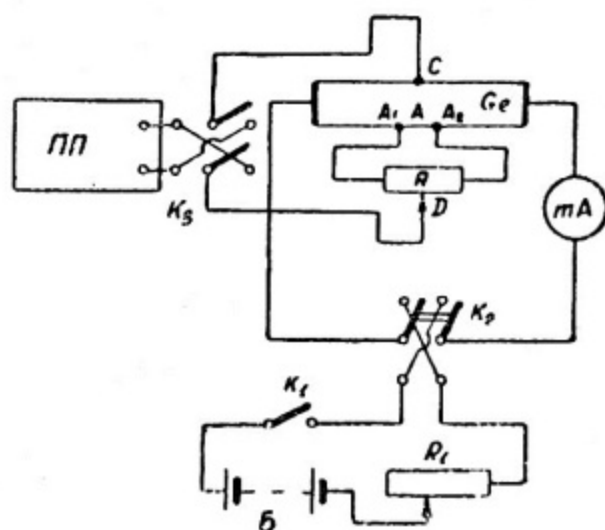


Рис. 15.4

На рис. 15.4 показана схема установки. Образец германия Ge, имеющий прямоугольную форму, закреплен в держателе. Через образец германия пропускается постоянный ток, создаваемый источником тока B. В цепь источника тока включены миллиамперметр mA, реостат R_1 , переключатель K_2 и ключ K_1 .

Для изучения явления Холла образец помещается в поле электромагнита. Электромагнит питается от выпрямителя. В цепь включены реостат и амперметр, что дает возможность устанавливать ток в обмотке электромагнита.

Разность потенциалов измеряется методом компенсации. Для этого к контактам D и C через переключатель K_3 подключают потенциометр ПП (устройство прибора и правила работы даны в приложении к работе 6).

Контакты с германиевым образцом выполнены с помощью трех электродов A_1 , A_2 и C . Меняя положение движка D , можно найти среднюю точку A , лежащую на одной эквипотенциали с точкой C (см. работу 14). В этом случае при пропускании тока через образец, выведенный из магнитного поля, разность потенциалов равна нулю, и гальванометр потенциометра ПП показывает отсутствие тока.

З а д а н и е

1. Измерение зависимости поперечной разности потенциалов от силы тока в образце

1. Выключить магнитное поле и включить ток через образец. С помощью потенциометра R добиться компенсации разности потенциалов между электродами, вызванной асимметрией их расположения. Такую подготовку схемы к измерениям производить при каждой новой силе тока через образец и при каждом изменении направления тока. Не забывать при этом выключать магнитное поле.

2. Включить магнитное поле и измерить с помощью потенциометра ПП поперечную разность потенциалов U . Изменить направление тока I и повторить измерение. Определить среднее значение из полученных величин.

3. Не меняя величины магнитного поля B , произвести измерения при нескольких значениях тока I через образец. В каждом случае определить среднее из двух значений, полученных для противоположных направлений тока.

4. Построить кривые $U=U(I)$ для образцов германия p - и n -типа.

2. Измерение зависимости поперечной разности потенциалов от величины напряженности магнитного поля

1. Измерить величину U при одном выбранном значении тока I , но при различных значениях магнитного поля. Перед началом измерений повторить подготовку, указанную в задании 1. Величину магнитной индукции B определить по градуировочному графику.

2. Измерения проделать для двух направлений тока, в каждом случае определить среднее значение U .

3. Снять зависимость $U=U(B)$ для образцов германия n - и p -типа.

4. Построить кривые $U=U(B)$.

3. Определение постоянной Холла, концентрации электронов и концентрации дырок

1. Подсчитать постоянную Холла R для образцов германия n - и p -типа. Для этого по графикам $U = U(I)$ определить среднее отношение U/I и по формуле (15.1) вычислить R .

2. По полученному значению постоянной Холла найти концентрацию электронов n_e в образце n -типа и концентрацию дырок n_p в образце p -типа.

Работа 16

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

ВВЕДЕНИЕ

Устройство, предназначенное для преобразования переменного тока в постоянный, называется выпрямителем.

Промышленность выпускает купроксные (или меднозакисные), селеновые, германиевые и кремниевые полупроводниковые выпрямители. Полупроводниковые выпрямители отличаются компактностью, достаточной механической прочностью и долговечностью.

Основным элементом полупроводникового выпрямителя является выпрямляющий контакт либо между металлом и полупроводником, либо между двумя полупроводниками с различными типами проводимости.

Один купроксный элемент (шайба или вентиль) представляет собой медную пластину круглой или прямоугольной формы, поверхность которой с одной стороны покрыта слоем окиси меди. С другой стороны к слою окиси меди прижимается свинцовая пластина. Окись меди является полупроводником с дырочной проводимостью.

Селеновый выпрямительный элемент представляет собой железную или алюминиевую пластину, на которую с одной стороны нанесен слой селена, являющегося полупроводником.

В купроксных и селеновых элементах граничный слой между полупроводником и металлом обладает выпрямляющими свойствами: способностью проводить ток в одном направлении.

Хорошо изучены и поддаются теоретическому расчету выпрямительные элементы, изготовленные из германия и кремния, которые в настоящее время получили широкое распространение. Рассмотрим принцип их действия. Будем считать, что выпрямительный элемент имеет вид плоского $p-n$ -перехода; $p-n$ -переход представляет собой кристалл германия или кремния, содержащий как область с электронной проводимостью (полупроводник n -типа), так и область с дырочной

проводимостью (полупроводник p -типа) *. На рис. 16.1 показано распределение концентраций доноров и акцепторов в образце из германия или кремния, содержащего p — n -переход, и показано условное обозначение p — n -перехода.

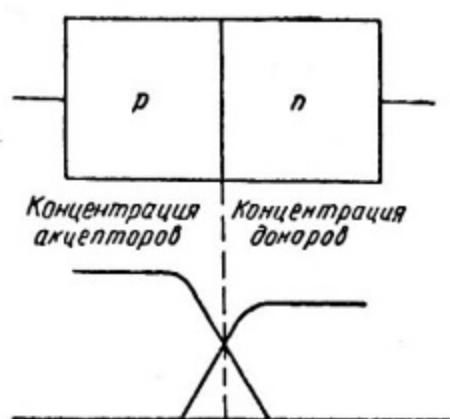


Рис. 16.1

Областью p — n -перехода является область, в которой концентрация донорных примесей равна концентрации акцепторных примесей.

В случае такого распределения примесей дырки из p -области будут диффундировать в область с электронной проводимостью, а электроны, наоборот, из области с электронной проводимостью — в область с дырочной проводимостью.

Уход дырки из приконтактного слоя области с дырочной проводимостью означает превращение атома акцепторной примеси в отрицательный ион, локализованный у границы p -области.

Уход электрона из приконтактного слоя области с электронной проводимостью означает превращение атома донорной примеси в положительный ион, локализованный у границы n -области.

Таким образом, на границе образуется двойной заряженный слой (рис. 16.2). Образование двойного заряженного слоя означает появление потенциального барьера, препятствующего прохождению электронов из n -области в p -область и дырок из p -области в n -область (см. рис. 16.2, а). Наличие потенциального барьера приводит к тому, что из n -области в p -область могут переходить только те электроны, энергия которых достаточна для преодоления потенциального барьера. В противоположном направлении могут переходить электроны любых энергий, поскольку этот переход не связан с преодолением потенциального барьера. Аналогичным образом переход дырок из p -области в n -область сопровождается

* Об электронной и дырочной проводимости см. работу 15.

преодолением потенциального барьера. В состоянии равновесия величина потенциального барьера оказывается такой, что полный ток через границу $p-n$ -перехода равен нулю.

Если к образцу с $p-n$ -переходом приложить внешнюю разность потенциалов «в прямом направлении», как показано на рис. 16.2, б, то приложенное электрическое поле будет

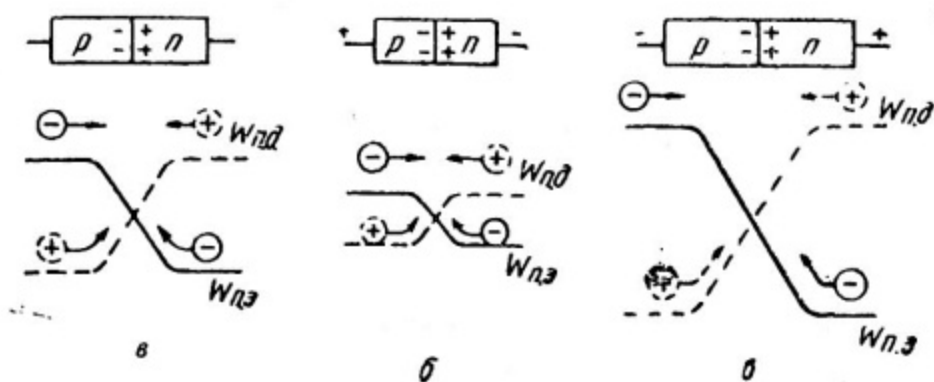


Рис. 16.2

способствовать прохождению электронов в p -область и дырок в n -область, т. е. по существу будет снижать величину энергетического барьера. При этом с увеличением приложенного напряжения величина барьера будет уменьшаться, а ток, протекающий по образцу через $p-n$ -переход, будет возрастать.

В том случае, когда к $p-n$ -переходу приложена разность потенциалов «в обратном направлении» (рис. 16.2, в), приложенное электрическое поле будет препятствовать прохождению носителей тока (дырок и электронов) через $p-n$ -переход, т. е. будет увеличивать величину потенциального барьера.

Таким образом, сопротивление $p-n$ -перехода (или выпрямляющего контакта) будет зависеть от направления приложенного поля (или тока).

Теоретический расчет дает следующее выражение для вольт-амперной характеристики $p-n$ -перехода:

$$i = i_s \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right), \quad (16.1)$$

где i_s — константа, зависящая от концентрации примесей и диффузионных констант и называемая «током насыщения»; T — температура, °К; k — постоянная Больцмана; e — заряд электрона; U — приложенное напряжение, взятое со своим знаком.

Из формулы (16.1) видно, что при больших положительных значениях напряжения U ток с ростом напряжения возрастает по экспоненциальному закону, т. е.

$$i \sim e^{\frac{eU}{kT}}. \quad (16.2)$$

- При этом сопротивление резко падает. Направление, соответствующее положительным U , называется «пропускным направлением».

При больших отрицательных значениях приложенного напряжения U («в запертом направлении»), когда экспонента мала по сравнению с единицей, значение тока стремится к постоянному значению i_s .

При слишком больших значениях приложенного напряжения может произойти пробой, т. е. разрушение выпрямляющего слоя, и ток начнет возрастать с ростом напряжения.

Вольт-амперная характеристика приведена на рис. 16.3.

Выпрямительные элементы для преобразования переменного тока в постоянный включаются по схемам, приводимым

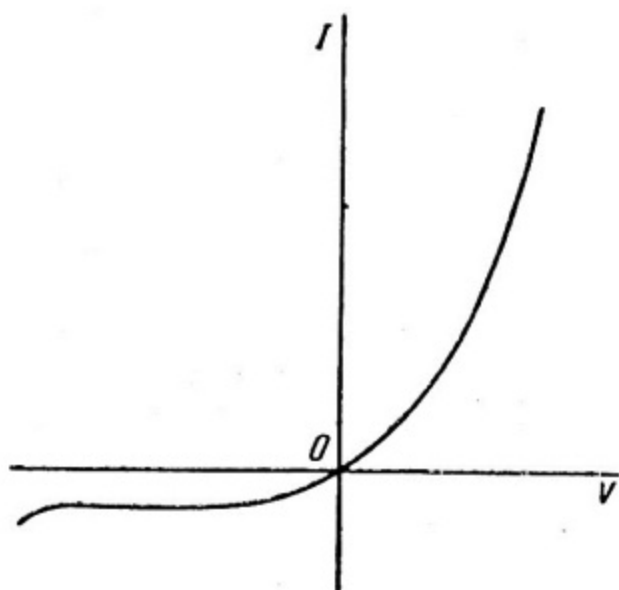


Рис. 16.3

ниже. При этом выпрямленный ток не строго постоянный, а является пульсирующим.

Для сглаживания пульсаций тока в цепи выпрямителя можно, например, ввести последовательно с сопротивлением нагрузки индуктивность. В этой индуктивности будет возникать э. д. с. самоиндукции, которая, как известно, действует в направлении, препятствующем изменениям тока.

Включение емкости (конденсатора) параллельно с сопротивлением нагрузки также позволяет снизить величину пуль-

саций выпрямленного тока за счет зарядки емкости при возрастании выпрямленного тока и разрядки емкости через сопротивление нагрузки при спадании выпрямленного тока.

На практике для полного сглаживания пульсации выпрямленного тока используются различные комбинации из емкостей и индуктивностей, называемые фильтрами.

З а д а н и е

1. Снятие вольт-амперной характеристики

Необходимые приборы: 1) селеновые выпрямительные шайбы или германиевый $p-n$ -переход, 2) батарея аккумуляторов, 3) вольтметр постоянного тока, 4) миллиамперметр, 5) реостат, 6) перекидной ключ.

1. Для получения вольт-амперной характеристики необходимо собрать цепь по схеме, приведенной на рис. 16.4.

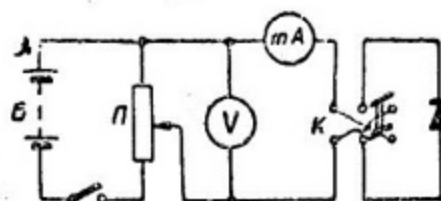


Рис. 16.4

Измерить зависимость силы тока, протекающего через выпрямительный полупроводниковый элемент, от приложенного напряжения. Измерения сделать сначала для прямого направления тока, а затем для обратного (для получения правильного значения приложенного напряжения необходимо учесть падение напряжения на миллиамперметре). Полученные значения удобно записать в виде таблицы.

2. Полученную вольт-амперную характеристику изобразить графически.

3. Построить график зависимости сопротивления выпрямительного элемента (или $p-n$ -перехода) от прямого напряжения в линейном масштабе и в полупологарифмическом масштабе ($\ln R, U$).

2. Получение вольт-амперной характеристики выпрямительного элемента или $p-n$ -перехода с помощью осциллографа

Необходимые приборы: 1) селеновые выпрямительные шайбы или германиевый $p-n$ -переход, 2) понижающий трансформатор, 3) сопротивление нагрузки 200 Ω , 4) электронный осциллограф, 5) автотрансформатор ЛАТР.

1. Собрать схему, приведенную на рис. 16.5. Напряжение на сопротивлении R пропорционально току, протекающему через выпрямительный элемент. Это напряжение подается на вертикальный вход осциллографа. Выпрямляемое напряжение подается на горизонтальный вход осциллографа.

В этом случае луч осциллографа вычерчивает на экране вольт-амперную характеристику в системе координат, где по вертикали отложен ток, а по горизонтали — напряжение.

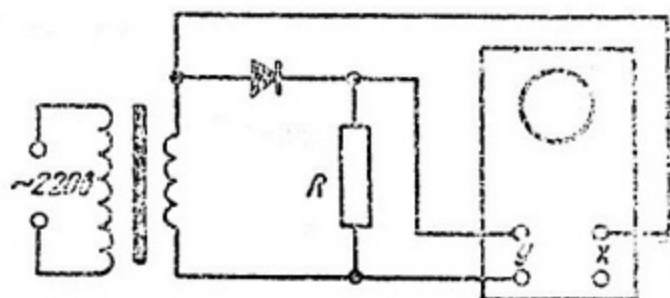


Рис. 16.5

2. Полученную на экране осциллографа кривую зарисовать или сфотографировать и сравнить с полученной в предыдущем задании.

3. Изучение действия выпрямительных схем

Необходимые приборы: 1) набор выпрямительных элементов, 2) понижающий трансформатор, 3) нагрузочное сопротивление, 4) осциллограф, 5) дроссель, 6) конденсатор.

Собрать цепь по схеме, приведенной на рис. 16.6.

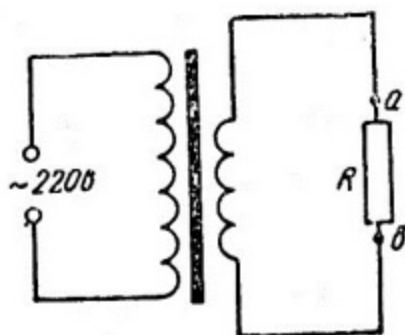


Рис. 16.6

В этом задании исследуемое напряжение подается непосредственно на Y -пластины осциллографа. Для этого во всех изучаемых схемах исследуемое напряжение (клеммы a , b) подается на Y -гнезда, расположенные на задней панели

осциллографа. Усилитель на У-входе должен быть выключен (соответствующий тумблер «Усил.» поставить вверх).

На экране осциллографа получить развертку во времени переменного тока с частотой 50 гц. Полученную синусоиду зарисовать или сфотографировать.

а) Однополупериодное выпрямление тока

Собрать цепь по схеме однополупериодного выпрямления (рис. 16.7). Полученную на экране осциллографа картину зарисовать или сфотографировать.

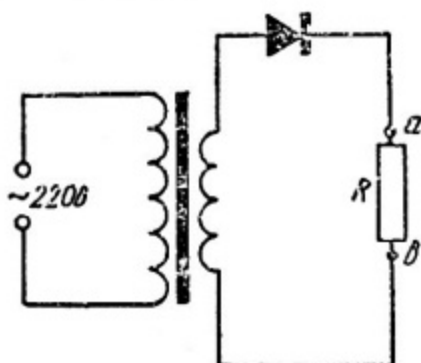


Рис. 16.7

б) Двухполупериодное выпрямление

Собрать цепь по схеме двухполупериодного выпрямления (рис. 16.8). Полученную на экране осциллографа картину зарисовать или сфотографировать.

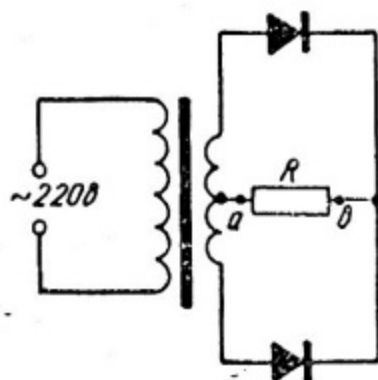


Рис. 16.8

в) Сглаживание пульсаций с помощью дросселя

Ввести в цепь дроссель, как показано на рис. 16.9.

Убедиться в том, что включение дросселя последовательно с сопротивлением нагрузки сглаживает пульсации выпрямлен-

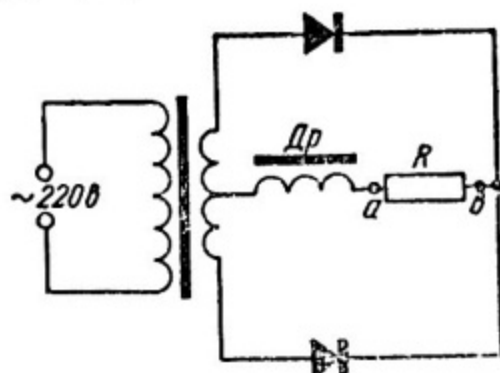


Рис. 16.9

ного тока. Полученную на экране осциллографа картину зарисовать или сфотографировать.

4. Сглаживание пульсаций с помощью дросселя и конденсатора

В цепь дополнительно ввести конденсатор, включаемый параллельно сопротивлению нагрузки (рис. 16.10). Получен-

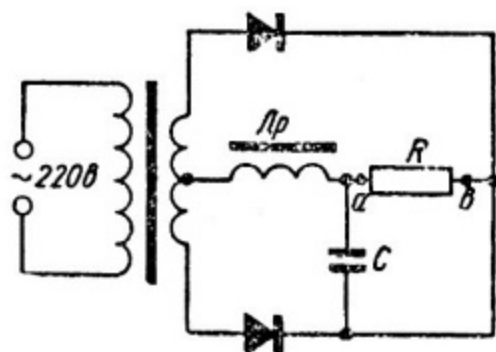


Рис. 16.10

ную картину выпрямленного тока зарисовать или сфотографировать.

5. Двухполупериодная мостовая схема

Собрать цепь по схеме, приведенной на рис. 16.11. Полученную картину выпрямленного тока зарисовать или сфотографировать.

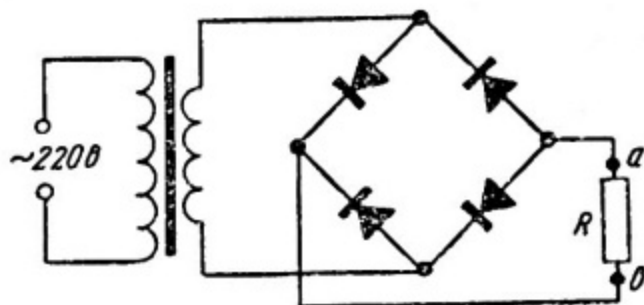


Рис. 16.11

Работа 17

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

ВВЕДЕНИЕ

Твердые тела по электрическим свойствам могут быть разделены на три класса: металлы, полупроводники и изоляторы. Полупроводники занимают промежуточное место по величине удельной электропроводности между металлами и изоляторами. Но не это количественное отличие выделяет полупроводники в особый класс веществ и обеспечивает им различные специфические области технических применений. Основным и характерным свойством полупроводников является та качественная особенность, что величина их электропроводности может очень сильно изменяться под действием различных факторов: температуры, освещения, давления и т. д. Электропроводность полупроводников резко возрастает с повышением температуры, в то время как в металлах она падает.

В металлах даже при самых низких температурах уже имеется большое количество ($\sim 10^{29} \text{ м}^{-3}$) свободных электронов. Тепловое движение в образовании электронов проводимости в металлах не играет существенной роли, и концентрация электронов проводника, таким образом, практически не зависит от температуры. Электропроводность металла, как показывает опыт, уменьшается с увеличением температуры. Эту закономерность легко понять, анализируя формулу для удельной электропроводности и учитывая при этом, что подвижность электронов падает с повышением температуры

$$\sigma = ne u_0, \quad (17.1)$$

где σ — удельная электропроводность; n — концентрация носителей тока; e — заряд электрона; u_0 — подвижность носителей тока (средняя скорость, приобретаемая носителем в электрическом поле, напряженность которого равна единице).

Совсем иначе обстоит дело в случае полупроводников, когда концентрация носителей тока сильно зависит от температуры. Рис. 17.1 иллюстрирует картину появления проводимости в полупроводнике при нагревании. Здесь показана энергетическая модель полупроводника, на которой изображены полосы энергий, которыми могут обладать электроны в полупроводнике, так называемые валентная зона и зона проводимости. Эти зоны дозволённых значений энергии отделены друг от друга интервалом запрещённых значений энергии — запрещённой зоной. Ширина запрещённой зоны обозначена ΔW_0 . В полупроводниках уровни валентной зоны полностью заняты электронами — зона заполнена. Поэтому для того, чтобы увеличить энергию электрона, необходимо сообщить ему энергию, не меньшую, чем ΔW_0 , производя, например, нагрев полупроводника (см. рис. 17.1а). При этом возникают носители тока: электроны и дырки. Их концентрация растёт с температурой по закону

$$n \sim e^{-\frac{\Delta W_0}{2kT}}, \quad (17.2)$$

где ΔW_0 — ширина запрещённой зоны; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Проводимость, возникающая в результате перехода электронов с верхних уровней валентной зоны в зону проводимости, называется собственной.

Если в основной кристаллической решетке полупроводника имеются примесные атомы, то в запрещённой зоне образуются узкие (локальные) энергетические уровни. На рис. 17.1, б и в представлены два наиболее интересных случая, когда примесные уровни располагаются или вблизи дна зоны проводимости, или вблизи валентной зоны. В первом случае электроны примесных атомов могут забрасываться при нагревании с этих уровней в зону проводимости, иначе говоря, они могут отрываться от примесных атомов и блуждать по кристаллу. Так возникает примесная электронная проводимость. Необходимая для этого энергия ΔW_d — энергия ионизации примеси — равна интервалу от примесного уровня до дна зоны проводимости. Она обычно намного меньше энергии возбуждения собственной проводимости. Примеси, поставляющие электроны в зону проводимости, называются донорами, а энергетические уровни этих примесей — донорными уровнями. В этом случае концентрация электронов проводимости изменяется по закону $n \sim e^{-\frac{\Delta W_d}{2kT}}$.

Рис. 17.1, в даёт представление о полупроводнике, в котором локальные незаполненные уровни располагаются вблизи валентной зоны. В отличие от предыдущего случая тепловое возбуждение будет в первую очередь переводить электроны

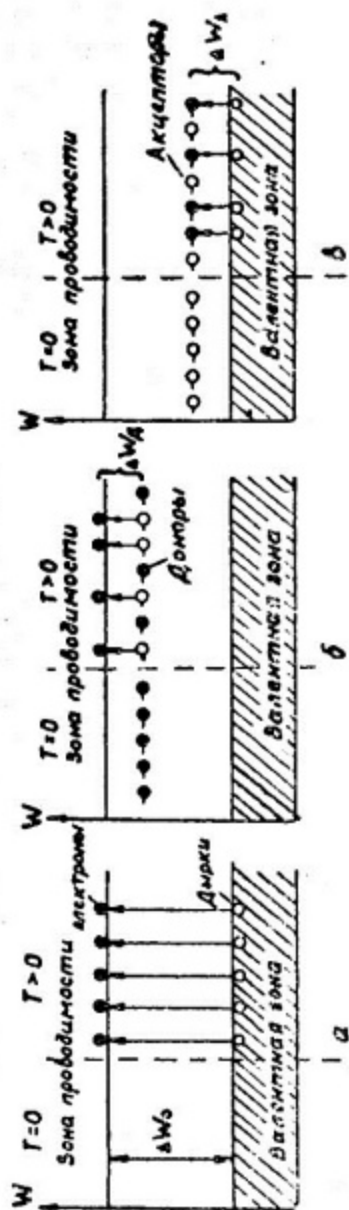


Рис. 17.1

из валентной зоны на эти пустые примесные уровни. Носителями тока будут дырки валентной зоны, и электропроводность называют дырочной. Примеси, «захватывающие» электроны из валентной зоны, называются акцепторами, а их энергетические уровни — акцепторными уровнями. Концентрация дырок проводимости при этом растет с температурой по за-

кону $n_+ \sim e^{-\frac{\Delta W_A}{2kT}}$, где ΔW_A — энергия ионизации акцепторов. Происхождение типов проводимости объясняется в работе 15.

Заметим, что энергетическая модель изолятора такая же, как на рис. 17.1, а, только ширина запрещенной зоны ΔW_0 будет для изолятора примерно на порядок больше.

Если представить, что в полупроводнике отсутствуют примеси (собственный полупроводник), то количество электронов в зоне проводимости, равное количеству дырок в заполненной зоне, как указывалось выше, будет пропорционально $e^{-\frac{\Delta W_0}{2kT}}$. Удельную электропроводность согласно формуле (17.1) можно записать в виде

$$\sigma = \sigma_1 e^{-\frac{\Delta W_0}{2kT}}. \quad (17.3)$$

Здесь σ_1 можно считать практически постоянной для данного образца, так как подвижность носителей тока зависит обычно от температуры значительно слабее (степенная функция температуры), чем их концентрация (экспонента с показателем — $\frac{\Delta W_0}{2kT}$, как правило, значительно большим, чем единица). При наличии примесей в полупроводнике проводимость при низких температурах будет главным образом обусловлена электронами или дырками примеси, потому что энергия их ионизации значительно меньше ширины запрещенной зоны.

Удельная электропроводность в этом случае запишется следующим образом:

$$\sigma = \sigma_2 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (17.4)$$

где ΔW — энергия ионизации примеси, равная или ΔW_+ или ΔW_A .

Величину σ_2 так же, как и σ_1 , можно считать постоянной при условии, что $\Delta W \gg 2kT$. При повышении температуры концентрация примесных носителей тока быстро достигает насыщения. Это означает, что освобождаются все донорные или заполняются электронами все акцепторные уровни. Вместе с тем по мере роста температуры все в большей степени начинает сказываться собственная проводимость. Поэтому

электропроводность полупроводника складывается из собственной и примесной:

$$\sigma = \sigma_1 e^{-\frac{\Delta W_0}{2kT}} + \sigma_2 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (17.5)$$

При низких температурах преобладает второе слагаемое (примесная проводимость), при высоких — первое (собственная проводимость).

Если построить график зависимости $\ln \sigma = f(1/T)$, то получится кривая, изображенная на рис. 17.2. На этом рисунке прямая *I*, изображающая первое слагаемое, круче наклонена

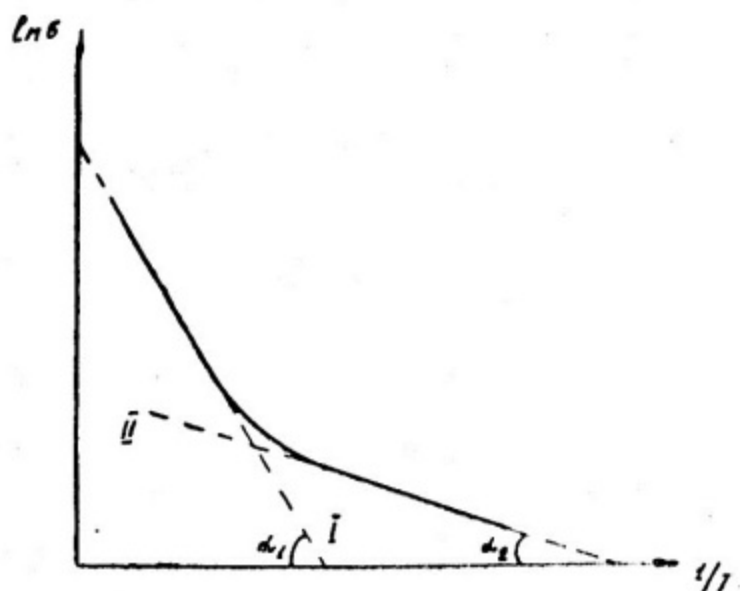


Рис. 17.2

к оси абсцисс, чем прямая *II*, отвечающая второму слагаемому. В соответствии с формулами (17.3) и (17.4)

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\Delta W_0}{2k}; \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\Delta W}{2k}. \quad (17.6)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) миллиамперметр, 2) нуль-гальванометр, 3) потенциометр Р-307, 4) батарея аккумуляторов, 5) сухая батарея, 6) переменные сопротивления, 7) эталонное сопротивление, 8) нормальный элемент Вестона, 9) милливольтметр, 10) электрический нагреватель, 11) автотрансформатор ЛАТР-2, 12) ключ.

На рис. 17.3 показана схема установки для измерения температурной зависимости полупроводников. Прямоуголь-

ный образец из полупроводника, укрепленный в кристаллодержателе, помещается для нагрева в электрический нагреватель. Температура образца измеряется термопарой T , подключенной к милливольтметру. Цена деления милливольтметра дана в *град/дел*.

Через образец пропускается постоянный ток, создаваемый источником B_1 . Включение тока производится ключом K_1 . Предварительная установка тока производится с помощью

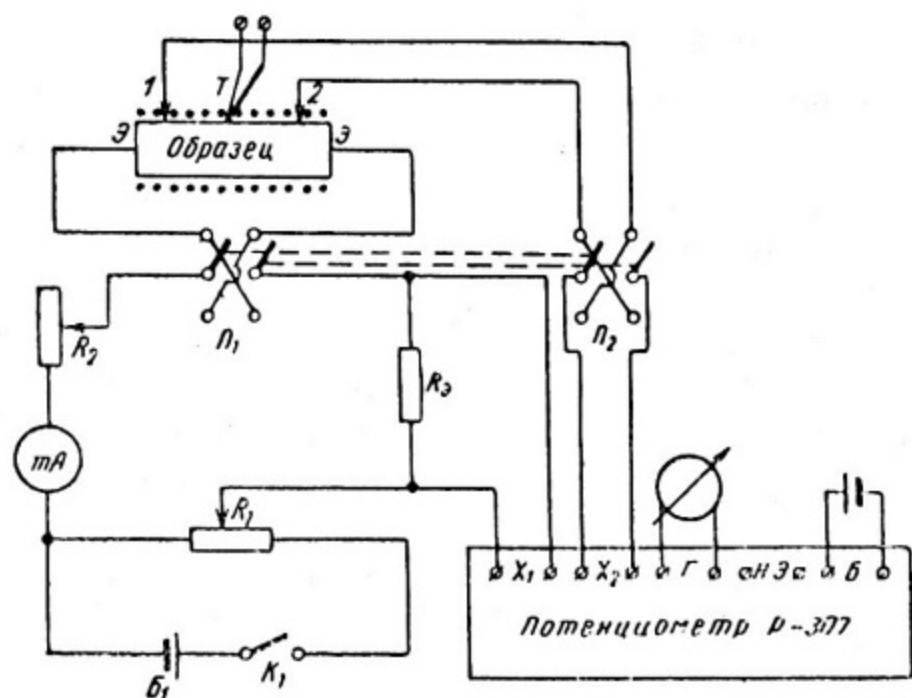


Рис. 17.3

переменных сопротивлений R_1 и R_2 на миллиамперметре mA . Более точно ток устанавливается на потенциометре $P-307$ путем измерения напряжения на эталонном сопротивлении R_3 (вход X_1). Принцип действия $P-307$ такой же, как и у $П3$ (см. работу 6). Направление тока в образце можно изменять переключателем $П_1$.

Напряжение, необходимое для расчета электропроводности образца, снимается с потенциальных зондов 1 и 2 и подается на вход X_2 потенциометра $P-307$. Изменение полярности на входе X_2 осуществляется переключателем $П_2$, который спарен с переключателем $П_1$.

Компенсационный метод измерения исключает влияние переходных сопротивлений контактов, которые у полупроводников могут иметь значительную величину. Для избежания возможных ошибок, вносимых случайными т. э. д. с., измерения должны быть произведены при прямом и обратном токе.

Расчет удельной электропроводности σ производится по формуле

$$\sigma = \frac{I}{SU_{\text{ср}}}, \quad (17.7)$$

где I — сила тока через образец; l — расстояние между зондами 1 и 2; S — площадь поперечного сечения образца; $U_{\text{ср}}$ — среднее из напряжений, измеренных на Р-307 при прямом и обратном токах.

Подготовка установки к измерениям

1. Подключить нормальный элемент и гальванометр к соответствующим зажимам потенциометра с соблюдением полярности.

2. Присоединить эталонное сопротивление R_3 и потенциальные зонды 1 и 2 к зажимам X_1 и X_2 соответственно.

3. Установить рабочий ток потенциометра. Для этого на декаде нормального элемента, обозначенной НЭ, выставляется значение, соответствующее э. д. с. нормального элемента при данной температуре. Переключатель «НЭ- X_1 - X_2 » ставят в положение НЭ, и включается кнопка 430 ком. После этого с помощью ручек, расположенных на левой части панели, приводят к нулю ток через гальванометр Г. Затем включается кнопка «О» и производится более точная регулировка тока.

4. Установить ток через образец, равный 1 ма. Грубая установка тока производится, как уже было указано, на миллиамперметре с помощью переменных сопротивлений R_1 и R_2 . Более тонкая установка тока производится на потенциометре. Для этого необходимо поставить переключатель «НЭ- X_1 - X_2 » в положение X_1 на измерение напряжения на R_3 . Если $R_3 = 10$ ом, выставляем на панели потенциометра справа значение в 0,01 в; в этом случае компенсация произойдет как раз при силе тока через образец в 1 ма. Компенсация производится с помощью ручек R_1 и R_2 и фиксируется на том же гальванометре Г.

Задание

1. Измерение температурной зависимости электропроводности полупроводников

1. Подключить терморпару к милливольтметру.
2. Установить потенциометр на измерение напряжения с зондов 1 и 2, для чего поставить переключатель «НЭ- X_1 - X_2 » в положение X_2 .
3. Измерить это напряжение при комнатной температуре.
4. Снять показания потенциометра через каждые 5°C до 100°C при прямом и обратном токах в образце.

Результаты измерения внести в следующую таблицу:

№ измерений	t °С	Напряжение между зондами		$U_{\text{ср}} = \frac{U_+ + U_-}{2}$	σ	$\ln \sigma$	$1/T$	Примечание
		U_+	U_-					

2. Определение ширины запрещенной зоны и энергии ионизации примеси

1. Построить график $\ln \sigma = f(1/T)$.

2. По графику определить ΔW_0 и ΔW согласно формулам (17.6).

Работа 18

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

ВВЕДЕНИЕ

Основными характеристиками ферромагнетиков можно считать следующие:

остаточную индукцию B_r ;

коэрцитивную силу H_c ;

предельное значение относительной магнитной проницаемости μ ;

удельные потери энергии при перемагничивании P .

Все эти параметры зависят от частоты перемагничивающего поля.

В основу определения магнитных характеристик в данной работе положено изучение кривых гистерезиса в магнитном поле с частотой 50 гц. Для наблюдения кривых гистерезиса

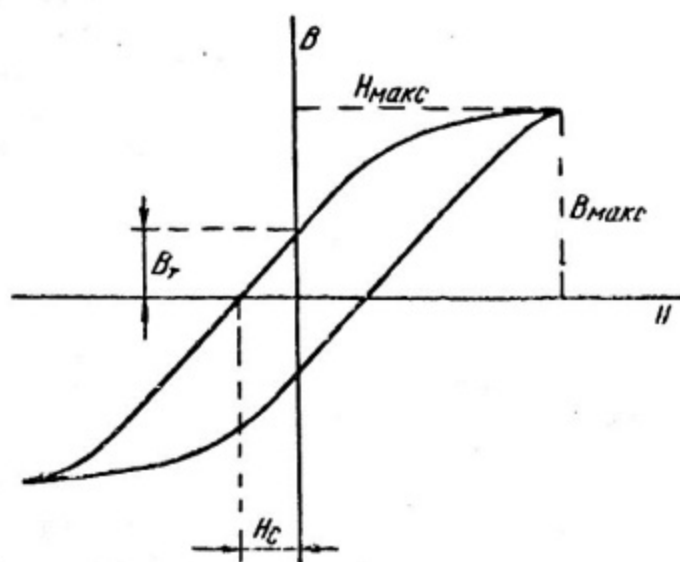


Рис. 18.1

и необходимых количественных калибровок используется электронный осциллограф. На рис. 18.1 показан характерный график петли гистерезиса. Форма и площадь этой кривой при низкой частоте поля и малых размерах образцов мало отличается от формы и площади графика статической петли гистерезиса, полученной в постоянном магнитном поле. Исследовав петлю гистерезиса, можно определить основные характеристики ферромагнетиков.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Необходимые приборы: 1) магнитное ярмо с обмотками возбуждения, 2) индикаторная катушка, 3) интегрирующая ячейка, 4) осциллограф ЭО-7, 5) импульсный милливольтметр В4-1А (ламповый), 6) амперметр переменного

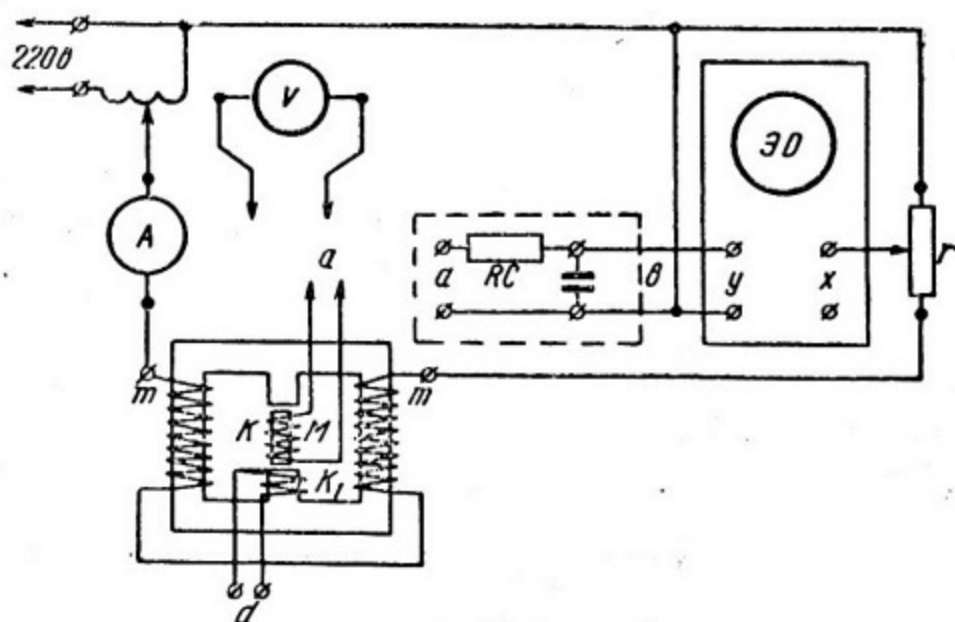


Рис. 18.2

тока на 5а, 7) лабораторный автотрансформатор, 8) реостаты, 9) входной разделительный трансформатор 220/127 в.

Принципиальная схема установки показана на рис. 18.2. Ферромагнитный образец М, находящийся внутри катушки К, помещается в зазор магнитного ярма, изготовленного из пластин трансформаторной стали с большим значением магнитной проницаемости.

Чтобы получить на экране осциллографа петлю гистерезиса, нужно на X-вход осциллографа подать напряжение, пропорциональное напряженности магнитного поля в образце, а на Y-вход осциллографа — напряжение, пропорциональное магнитной индукции. В данной схеме на X-вход осцил-

лографа подается напряжение на сопротивлении r , включенном последовательно с намагничивающими обмотками ярма. Это напряжение пропорционально току в обмотках и, следовательно, пропорционально напряженности магнитного поля H в зазоре ярма.

На Y -вход осциллографа подается напряжение на выходе интегрирующей RC -ячейки, включенной между индикаторной катушкой K и Y -входом.

В случае переменного магнитного поля в зазоре ярма в катушке K индуцируется э. д. с. и напряжение на выходе катушки K будет

$$U = N \frac{d\Phi}{dt} = SN \frac{dB}{dt}, \quad (18.1)$$

где Φ — магнитный поток через сечение образца M ; B — магнитная индукция в образце; S — площадь сечения образца, равная площади сечения катушки; N — число витков катушки K .

Из формулы (18.1) следует, что напряжение на выходе катушки K пропорционально не индукции B , а $\frac{dB}{dt}$.

Интегрирование напряжения проще всего осуществить при помощи RC -ячейки, удовлетворяющей условию $RC \gg T$, где T — период изучаемого процесса. При больших R и C падение напряжения на конденсаторе мало по сравнению с падением напряжения на сопротивлении, поэтому ток через ячейку равен $i = \frac{U}{R}$, где U — напряжение на выходе индикаторной катушки.

Напряжение на конденсаторе равно

$$U_c = \frac{\int i dt}{C} = \frac{1}{RC} \int U dt. \quad (18.2)$$

Используя соотношение (18.1), получаем

$$U_c = \frac{1}{RC} SN \int dB = \frac{1}{RC} SNB. \quad (18.3)$$

Следовательно, напряжение на выходе интегрирующей ячейки U_c , подаваемое на Y -вход осциллографа, пропорционально магнитной индукции в исследуемом ферромагнитном образце.

Таким образом, при протекании переменного тока в обмотках магнитного ярма на экране осциллографа возникает замкнутая кривая, воспроизводящая в некотором масштабе петлю гистерезиса. Для определения характеристик ферромагнетика необходимо определить масштаб изображения.

Измерение напряженности магнитного поля H . В зазор магнитного ярма вставляется индикаторная

катушка K без исследуемого образца и подключается к ламповому вольтметру V . При протекании по обмотке ярма синусоидального тока частотой ω напряженность магнитного поля в зазоре будет меняться по закону $H = H_m \sin \omega t$, и магнитная индукция в катушке будет равна $B = \mu' \mu_0 H = \mu_0 H_m \sin \omega t$ (относительная магнитная проницаемость воздуха $\mu' = 1$). Напряжение на выходе катушки может быть найдено по формуле (18.1) и равно

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

где

$$U_m = \mu_0 N S \omega H_m.$$

Вольтметр V регистрирует действующее напряжение

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mu_0 N S \omega H_m. \quad (18.4)$$

Следовательно, измерив U на клеммах индикаторной катушки K и используя соотношение (18.4), можно вычислить амплитудное значение магнитного поля H_m в зазоре ярма. Если в зазор ярма помещается цилиндрический образец так, как указано на рис. 18.2, и при этом площадь образца много меньше площади сечения ярма, то напряженность магнитного поля в зазоре ярма без образца и с образцом одинакова.

Измерение постоянной RC интегрирующей ячейки. Для определения постоянной RC используется вспомогательная катушка K_1 , концы которой подаются на вход интегрирующей ячейки (соединяются клеммы d и a).

Напряжение на клеммах катушки K_1 изменяется по закону:

$$U(t) = U_m \sin \omega t.$$

Из формулы (18.2) следует, что напряжение на конденсаторе C , т. е. на выходе RC -ячейки будет

$$U_c(t) = \frac{1}{RC} \int U dt = -\frac{1}{RC} \cdot \frac{U_m}{\omega} \cos \omega t,$$

следовательно, амплитуды напряжений на входе и выходе интегрирующей ячейки связаны соотношением

$$U_{cm} = \frac{1}{RC} \cdot \frac{U_m}{\omega}. \quad (18.5)$$

Напряжение на входе измеряется ламповым вольтметром V , который дает действующее значение $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, а напряжение на выходе измеряется на осциллографе и при этом

определяется амплитуда напряжения U_y . Из соотношения (18.5) следует, что значение RC вычисляется по формуле

$$RC = \frac{\sqrt{2}}{\omega} \cdot \frac{U}{U_y}. \quad (18.6)$$

Задание

1. Сборка схемы

Собрать схему согласно рис. 18.2. Некоторые части схемы смонтированы в виде отдельных блоков (рис. 18.3), и их необходимо только правильно соединить. На панели магнитного ярма (см. рис. 18.3) расположены: клеммы a — вход интегрирующей ячейки; клеммы b — ее выход; клеммы d — вы-

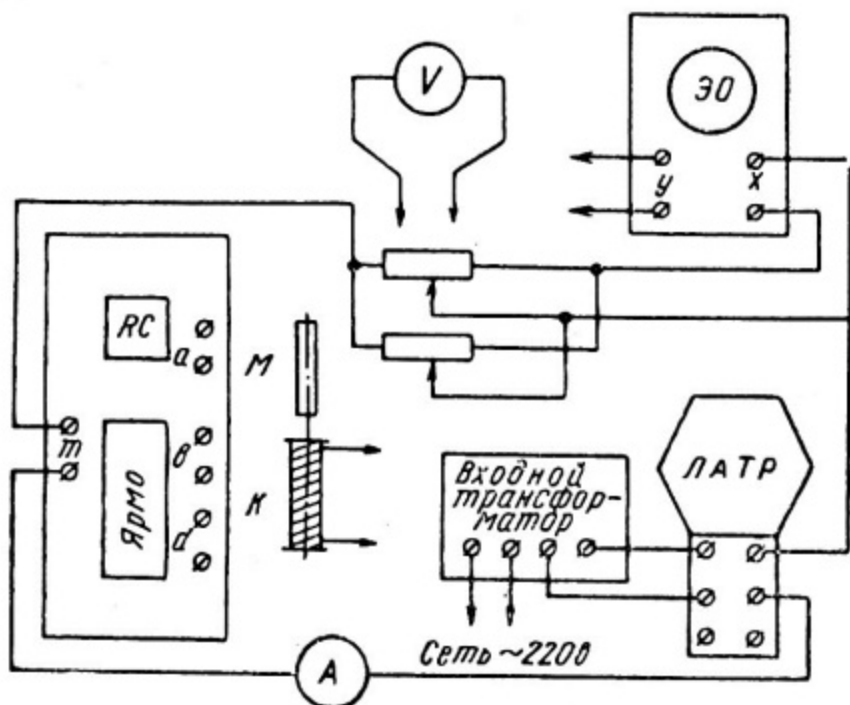


Рис. 18.3

ход обмотки катушки K_1 и клеммы t — выход обмоток возбуждения магнитного ярма. Выход RC -ячейки подан на Y -вход осциллографа, на X -вход подано напряжение на участке сопротивления r (см. рис. 18.2). Сила тока I в обмотках возбуждения магнитного ярма регулируется лабораторным трансформатором (ЛАТР). Для более безопасной работы на установке напряжение на лабораторный автотрансформатор подается с выходного разделительного трансформатора.

Запрещается включать ЛАТР прямо в сеть. Следует помнить, что в его входной цепи напряжение 220 в! Напряжение с ЛАТР подается только при измерениях и после окончания измерений немедленно должно быть снижено до нуля.

Для устранения помех в работе осциллографа (влияние магнитного поля на усилители осциллографа) его следует расположить на максимально возможном удалении от магнитного ярма, а провода, идущие к осциллографу, — экранировать.

2. Наблюдение петли гистерезиса на осциллографе

В рабочий зазор ярма помещают индикаторную катушку K , в которую вставлен исследуемый магнитный образец. Выход катушки K соединяют с входом интегрирующей RC -ячейки (клеммы a). Генератор развертки осциллографа должен быть выключен (крайнее левое положение ступенчатого переключателя диапазонов частоты развертки). Установить ток I и усиление на X - и Y -входах осциллографа так, чтобы на экране осциллографа получить предельную динамическую петлю гистерезиса, т. е. такую, чтобы при дальнейшем увеличении тока в обмотках возбуждения ярма ее площадь заметно не изменялась. Петля гистерезиса должна быть получена без наложений (перехлестывания) и размером не менее 80×80 мм. Размер петли на экране осциллографа зависит от положения ручек «Усиление». Поэтому положение этих ручек необходимо отметить в лабораторном журнале.

Наблюдаемую петлю следует срисовать на кальку, положенную на экран осциллографа, и далее перевести на миллиметровую бумагу не менее чем по двадцати точкам, равномерно расположенным по ее периметру.

3. Калибровка горизонтальной оси осциллографа

В рабочий зазор магнитного ярма помещается индикаторная катушка K без магнитного образца. Катушка K остается подключенной к клеммам a и к этим клеммам также подключается ламповый вольтметр V . (Правила работы с импульсным милливольтметром см. в приложении к работе.) Положение ручки «Усиление» по оси X осциллографа должно быть таким же, как и при наблюдении петли гистерезиса. Ручку «Усиление» по оси Y поставить на 0.

Для шести—восьми значений тока I сопоставить величину горизонтального смещения луча Δx на экране осциллографа и соответствующее напряжение U на вольтметре.

По формуле (18.4) пересчитать полученные значения U в значения H . Результаты измерений записать в виде таблицы.

Построить график $H = H(\Delta x)$. В случае прямолинейной зависимости определить масштаб m_H по оси X в единицах $a/m \cdot мм$.

4. Калибровка вертикальной оси осциллографа

К входу RC -ячейки (клеммы a) подключить понижающий трансформатор, т. е. катушку K_1 (клеммы d). Индикаторная катушка K отключается от схемы и может быть вынута из зазора ярма. На выход RC -ячейки (клеммы b) подключить ламповый вольтметр V . Положение ручки «Усиление» по оси Y поставить таким же, как и при получении кривой гистерезиса. Ручку «Усиление» по оси X поставить на 0. Регулируя автотрансформатором напряжение на входе ячейки, снять зависимость вертикального смещения луча Δy на экране осциллографа от напряжения U на выходе RC -ячейки.

Построить график $U = U(\Delta y)$.

Если усиление по осям X и Y приходится менять, например при исследовании нового магнитного образца, то необходимо заново производить калибровку.

5. Определение постоянной RC интегрирующей ячейки

Вход RC -ячейки остается подключенным к катушке K_1 (клеммы a и d соединены). К этим клеммам также подключить ламповый вольтметр V . Регулируя автотрансформатором входное напряжение на RC -ячейке, получить на экране осциллографа вертикальное смещение луча некоторого размера (50—100 мм). Положение ручек усилителей то же, что и в задании 2.

С помощью калибровочного графика (задание 4) найти соответствующее этому отклонению луча значение напряжения U_y . Выраженное в вольтах вертикальное отклонение луча U_y и соответствующее показание вольтметра U подставить в формулу (18.6) и вычислить величину RC . Найти среднее значение RC из пяти независимых измерений и сопоставить с теоретическим значением, вычисленным по номинальным величинам R и C .

После того как получено значение RC , можно произвести калибровку оси Y осциллографа в единицах магнитной индукции B . Для этого по формуле (18.3) вычислить коэффициент для пересчета значений U в значения B . В случае, если график $U = U(\Delta y)$ (задание 4) прямолинейный, определить масштаб m_B в единицах $мл/мм$.

6. Определение основных характеристик ферромагнетика

Исследовав полученную кривую гистерезиса и используя калибровочные графики, определить:

1) остаточную индукцию B_r и коэрцитивную силу H_c ;

2) предельную относительную магнитную проницаемость образца, которая вычисляется по формуле

$$\mu = \frac{B_{\text{макс}}}{\mu_0 H_{\text{макс}}};$$

3) удельные потери энергии P в образце при перемагничивании в переменном магнитном поле с частотой ν , которые вычисляются по формуле

$$P = \frac{S m_B m_H \nu}{\rho} \text{ вт/кг},$$

где S — площадь кривой гистерезиса по графику в мм^2 ; m_H и m_B — масштабы по осям H и B ; ρ — плотность материала магнитного образца.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МИЛЛИВОЛЬТМЕТР ИМПУЛЬСНЫЙ ТИПА В4-1А

(правила работы с прибором)

Прибор предназначен для измерения малых видеоимпульсных напряжений прямоугольной формы и синусоидальных напряжений.

Пределы измеряемых напряжений: от 10 до 3000 мв; с прилагаемым делителем напряжения от 1 до 300 в.

Приведенная погрешность (см. работу 2) в диапазоне частот от 50 гц до 2 кгц равна $\pm 4\%$; при использовании делителя напряжений $\pm 6\%$.

Милливольтметр состоит из следующих частей: пробника, аттенюатора, усилителя, амплитудного детектора с усилителем постоянного тока и стрелочным прибором и блока питания. Все части прибора заключены в общий кожух, кроме пробника, смонтированного в цилиндрическом экране и соединенного с прибором многожильным проводом с экранированной оплеткой. На пробнике есть резьба для навинчивания специальных насадок: кольцевой со штепсельной вилкой и делителя напряжения 1:100.

Измерение напряжений

Перед включением установить нуль стрелочного прибора с помощью корректора. После включения прибора дать ему прогреться в течение 15 мин, после чего, закоротив входные клеммы пробника, установить нуль ручкой «Установка нуля». После этого прибор готов к работе.

Любые измерения следует начинать с включенным делителем напряжения. Только после того, как убедились в том, что измеряемые напряжения малы, можно свинтить делитель с корпуса пробника и перейти на шкалу 10—3000 мв.

Стрелка измерителя очень медленно возвращается к нулю, так как постоянная времени детектора очень большая. Для быстрого возвращения стрелки к нулю пользуйтесь специальной разрядной кнопкой с надписью «Разряд».

При измерении синусоидальных напряжений следует использовать шкалу «0,707 V пик», отсчет по которой соответствует действующему значению измеряемого синусоидального напряжения.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ ЗВУКОВОЙ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ ТИПА ЗГ-12М

(правила работы с прибором)

Генератор типа ЗГ-12М представляет собой источник синусоидальных электрических колебаний звуковой и ультразвуковой частот.

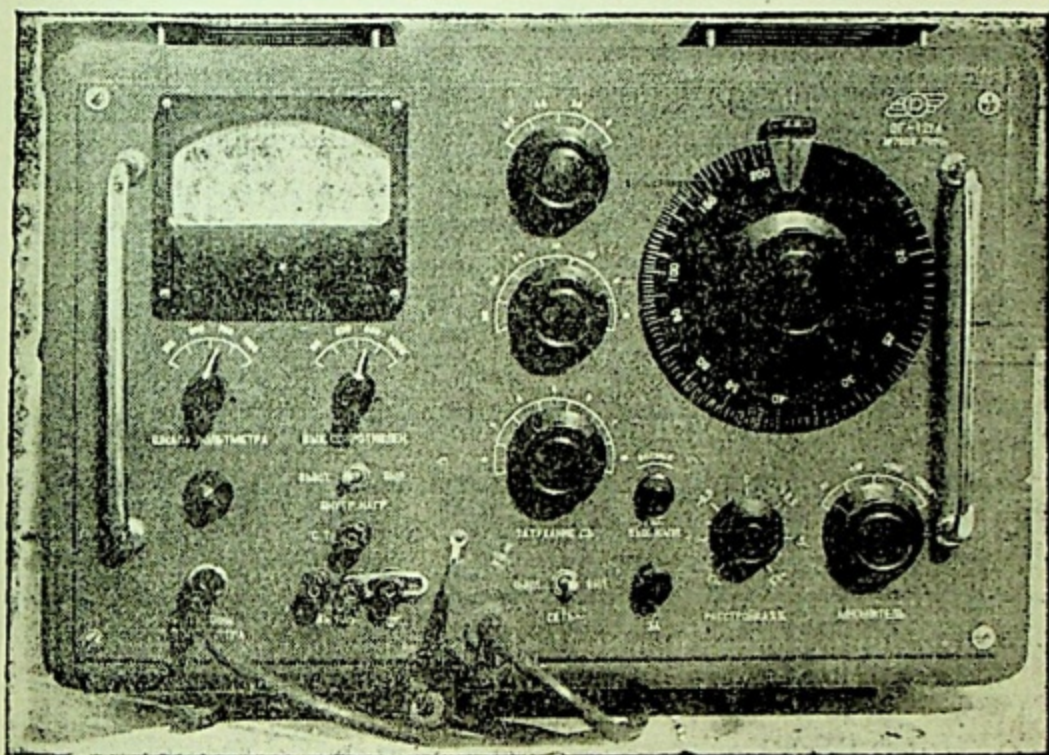


Рис. I.1

На рис. I.1. показана панель генератора, на которой расположены ручки управления.

1. Включение генератора

Вилку шнура питания включить в сеть переменного тока напряжением 220 в. Тумблер включения сети поставить в положение «Вкл.», при этом должна загореться сигнальная лампочка.

К работе следует приступить после предварительного прогрева прибора в течение 20—30 мин.

2. Установка частоты

Генератор ЗГ-12М генерирует колебания в диапазоне частот от 20 до 200 000 гц.

Частота устанавливается поворотом ручки переключателя «Множитель» (ступенчатая регулировка) и поворотом лимба (плавная регулировка). Для определения установленной частоты в герцах нужно отсчет по шкале лимба перемножить на показание переключателя «Множитель».

Вращением ручки «Расстройка %» можно плавно изменять частоту в пределах $\pm 1,5\%$ от установленной.

3. Регулировка и измерение амплитуды выходного напряжения

Возбуждаемые в генераторе колебания подаются на клеммы «Выход». Напряжение на выходе регулируется ручкой «Рег. вых. напр.» (плавная регулировка) и тремя переключателями «Затухание, дб» (ступенчатая регулировка).

Выходное напряжение измеряется вольтметром, расположенным в верхней левой части панели. Вольтметр имеет четыре предела измерений, переключение которых производится ручкой «Шкала вольтметра». При измерении напряжений в гнездо «Пробник вольтметра» вставляется штеккер выносного шланга с пробником, щуп которого подводится к измеряемому напряжению.

Выходное напряжение может быть измерено двумя способами. Если пробник вольтметра включают в клемму «Выход», то вольтметр показывает непосредственно напряжение на выходе. Такие измерения можно производить только при несимметричном выходе (вторая клемма выхода заземлена), так как вольтметр имеет общую точку заземления с генератором.

При втором способе пробник вольтметра включается в гнездо «Контроль аттенюатора». При таком подключении вольтметра напряжение на выходе равно напряжению, показываемому вольтметром только в случае, когда переключатели «Затухание, дб» введены и переключатель «Вых. сопротивл.» поставлен в положение 600. Если пе-

реключатели «Затухание, дб» введены и переключатель «Рег. вых. напр.» поставлен в любое другое положение, то для определения выходного напряжения необходимо сделать соответствующий пересчет показаний вольтметра.

Показания переключателей «Затухание, дб» определяют «затухание», т. е. отношение интенсивности колебаний на выходе к интенсивности колебаний, подаваемых на вольтметр, выраженное в децибелах.

Общее затухание равно сумме децибел, показанных на трех переключателях.

В табл. I.1 дан перевод децибел в отношении напряжений.

Таблица I.1

Перевод децибел в отношении напряжений

Децибелы	Отношение напряжений, (k_1)	Децибелы	Отношение напряжений (k_2)
0	1	10	$3,162 \cdot 10^{-1}$
1	0,8913	20	10^{-1}
2	0,7943	30	$3,162 \cdot 10^{-2}$
3	0,7079	40	10^{-2}
4	0,6310	50	$3,162 \cdot 10^{-3}$
5	0,5623	60	10^{-3}
6	0,5012	70	$3,162 \cdot 10^{-4}$
7	0,4467	80	10^{-4}
8	0,3981	90	$3,162 \cdot 10^{-5}$
9	0,3548	100	10^{-5}

4. Согласование выхода генератора с нагрузкой

Сопротивление выходного устройства генератора должно быть согласовано с сопротивлением нагрузки, поданной на клеммы «Выход». При работе генератора на внешнюю нагрузку, не превышающую 5000 ом, необходимо установить переключатель «Вых. сопротивлен.» в одно из четырех положений (50, 200, 600 или 5000), наиболее соответствующее величине нагрузки.

При работе генератора на нагрузку выше 5000 ом необходимо включить тумблер «Внутр. нагр.» и переключатель «Вых. сопротивление» поставить в одно из четырех положений.

При переключении выходного сопротивления генератора изменяется и выходное напряжение. Выходное напряжение

можно определить умножением напряжения при выходном сопротивлении 600 *ом* на соответствующий коэффициент.

Эти коэффициенты даны в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Выходное сопротивление генератора, <i>ом</i>	Коэффициент изменения напряжения, (k_3)
50	0,280
200	0,576
600	1,000
5000	2,890

Пример.

Определить напряжение на выходе генератора, если пробник вольтметра включен в клемму «Аттенюатор» и вольтметр показывает 20 *в*. При этом переключатель «Вых. сопротивлен.» в положении 200, а общее затухание равно 56 *дб*.

Из табл. 1.1 следует, что для 50 *дб* отношение напряжений равно $3,162 \cdot 10^{-3}$, для 6 *дб* — 0,5012. Следовательно, соответствующее отношение для 56 *дб* равно

$$3,162 \cdot 10^{-3} \times 0,5012 = 1,585 \cdot 10^{-3}.$$

Коэффициент изменения напряжения при выходном сопротивлении 200 *ом* равен 0,576 (табл. 1.2). Отношение напряжений на выходе к напряжению, показываемому вольтметром в данном случае, равно

$$1,585 \cdot 10^{-3} \times 0,576 = 0,913 \cdot 10^{-3}.$$

Умножая показания вольтметра на вычисленный коэффициент, получаем, что действующее (или эффективное) напряжение на выходе генератора $U = 1,83 \cdot 10^{-2}$ *в*.

Как известно, амплитудное значение напряжения равно $U_m = \sqrt{2} U$.

Следовательно, амплитуда выходного напряжения вычисляется по формуле

$$U_m = \sqrt{2} k_1 k_2 k_3 U,$$

где U — показание вольтметра, k_1 , k_2 , k_3 , — коэффициенты, зависящие от положения переключателей «Затухание, *дб*» и «Вых. сопротивлен.».

ПРИЛОЖЕНИЕ II

АМПЕРВОЛЬТОММЕТР ТИПА ТТ-1*

(правила работы с прибором)

Прибор предназначен для измерения постоянного тока и напряжения, переменного напряжения и сопротивлений.

Погрешность прибора не превышает следующих значений: при измерении постоянного тока и напряжения $\pm 3\%$ номинального значения шкалы;

при измерении напряжения переменного тока $\pm 4\%$ номинального значения шкалы;

при измерении сопротивления $\pm 10\%$ измеряемой величины.

Для подключения прибора к измеряемой цепи используются провода со специальными штеккерными наконечниками.

Измерение постоянного тока и напряжения

1. Установить переключатель рода измерений в положение, обозначенное знаком «=».

2. Вставить короткий штеккер проводника в гнездо с надписью «Общ.».

3. При измерении тока короткий штеккер второго проводника вставить в одно из гнезд с надписью *mA*, соответствующее выбранному диапазону измерений.

4. При измерении напряжений короткий штеккер второго проводника вставить в соответствующее выбранному диапазону измерений гнездо, обозначенное буквой *V* и знаком «=».

5. Свободные штеккеры проводников подключить к измеряемой цепи. Необходимо помнить, что гнездо «Общ.» соответствует клемме со знаком «—».

6. Произвести отсчет по шкале прибора, помеченной знаком «=», предварительно определив цену деления.

* В лабораторной практике этот прибор называют ТЕСТЕР.

Измерение переменного напряжения

С помощью прибора может быть измерено переменное напряжение с частотой от 50 до 1000 гц. Для этого необходимо:

1. Установить переключатель рода измерений в положение, обозначенное знаком « \sim ».
2. Вставить короткие штекеры проводников в гнездо с надписью «Общ.» и в соответствующее выбранному диапазону измерений гнездо, обозначенное буквой «V» и знаком « \sim ».
3. Свободные штекеры проводников подключить к измеряемому напряжению.
4. Определить напряжение по шкале, помеченной знаком « \sim », предварительно определив цену деления.

Примечание. Для обеспечения нормальной работы должны соблюдаться следующие условия:

1) При измерениях напряжения переменного тока (во избежание порчи прибора) категорически запрещается переводить переключатель рода измерений из одного положения в другое, не отключив прибор от проверяемой цепи.

2) При наличии в проверяемой цепи постоянного и переменного тока прибор подключается через разделительный конденсатор, при этом измеряется только переменная составляющая проверяемого напряжения.

Измерение сопротивлений

1. Установить переключатель рода измерений в положение, обозначенное знаком « Ω ».
2. Вставить короткий штеккер одного проводника в гнездо тестера с надписью «Общ.».
3. Короткий штеккер второго проводника вставить в гнездо с надписью « Ω », множитель которого должен быть порядка величины измеряемого сопротивления.
4. Перед началом измерений установить нуль омметра, для этого замкнуть концы штеккеров и вращением ручки «Нуль омметра» установить стрелку прибора по верхней шкале на цифру 0 (после установки нуля не допускаются какие-либо манипуляции с ручкой «Нуль омметра»).
5. Свободные штекеры проводников подключить к концам измеряемого сопротивления.
6. Произвести отсчет по верхней шкале прибора и умножить полученную величину на выбранный множитель.
7. Установку стрелки на нуль шкалы омметра необходимо производить после каждой перестановки штеккера в гнездо с другим множителем.

Если при повороте ручки «Нуль омметра» до отказа не удастся установить стрелку прибора на нуль шкалы, то это

означает, что необходимо заменить источник тока, находящийся внутри прибора.

Примечание. Все измерения тестером как омметром следует производить только при обесточенных цепях.

Проверка цепей

Омметр тестера на любой из своих шкал может служить для проверки участков электрических цепей на обрыв и короткое замыкание.

Для этого тестер подключают к испытываемой цепи и по отклонению стрелки судят об исправности цепи.

Примечание. Не рекомендуется долго держать штеккерные концы проводов подключенными к измеряемому сопротивлению, а также замкнутыми накоротко.

АМПЕРВОЛЬТОММЕТР УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТИПА Ц52

(Правила работы с прибором)

Прибор предназначен для измерения постоянного тока и напряжения, переменного тока и напряжения частотой от 45 до 1000 гц, сопротивлений, емкости, усиления и затухания.

Класс точности по постоянному току 1,5, по переменному току 2,5.

Для измерения сопротивлений; тока и напряжения необходимо соединительные провода подключить к клеммам, помеченным знаком «+» и «-».

На свободные концы соединительных проводов надеть «щупы» или зажимы типа «крокодил» и подключить к измеряемой цепи.

Главный переключатель прибора устанавливается в соответствии с величиной измеряемого тока, напряжения или сопротивления.

Малый переключатель (в левом верхнем углу) устанавливается в положение «Ω» при измерении постоянного тока и сопротивлений, и в положение «μF» при измерении переменного тока.





При измерении сопротивлений следует производить установку нуля для каждого предела измерений. Для этого соединительные провода замыкают накоротко и вращением ручки «Установка нуля» совмещают стрелку прибора с нулевым делением шкалы сопротивлений (верхняя шкала, помеченная знаками «kΩμF»).

ПРИЛОЖЕНИЕ III


УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, НАНОСИМЫЕ НА ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

1. Обозначения принципа действия прибора

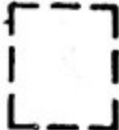
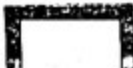

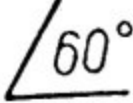
НАИМЕНОВАНИЕ	Условное обозначение
Магнитсэлектрический прибор с подвижной рамкой	
Электромагнитный прибор	
Электродинамический прибор	
Ферродинамический прибор	

НАИМЕНОВАНИЕ	Условное обозначение
Индукционный прибор	
Вибрационный прибор	
Тепловой прибор	
Электростатический прибор	

2. Дополнительные обозначения

<p>Защита от внешних магнитных полей (I категория защищенности)</p>	
---	--

Продолжение приложения III

НАИМЕНОВАНИЕ	Условное обозначение
Защита от внешних электрических полей (I категория защищенности)	
Горизонтальное положение шкалы	
Вертикальное положение шкалы	
Наклонное положение шкалы	
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например 2 кв.	