

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ФИЗИКА

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов всех специальностей и направлений подготовки
очной и заочной форм обучения*

ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ПОСТОЯННЫЙ ТОК



УДК 535
ББК 22.31
Ф55

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «12» декабря 2024 г.,
протокол № 4

Составители: канд. физ.-мат. наук, доц. О. Е. Коваленко;
канд. физ.-мат. наук, доц. А. И. Ляпин;
ст. преподаватель Е. В. Пивоварова;
д-р физ.-мат. наук, доц. А. В. Хомченко

Рецензент канд. техн. наук Н. В. Герасименко

В методических рекомендациях излагаются общие сведения об изучаемых явлениях, описание лабораторных установок и принцип их действия, приводятся программы выполнения работ по разделам «Электростатика» и «Постоянный ток» курса «Физика».

Учебное издание

ФИЗИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2025

Содержание

Правила охраны труда и техники безопасности при выполнении лабораторных работ	4
1 Лабораторная работа № 1. Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры	5
1.1 Общие сведения	5
1.2 Описание лабораторной установки для измерений первым способом	7
1.3 Описание лабораторной установки для измерений вторым способом	9
2 Лабораторная работа № 2. Определение энергии ионизации атомов аргона.....	10
2.1 Общие сведения	10
2.2 Описание лабораторной установки	13
2.3 Программа работы	14
3 Лабораторная работа № 3. Измерение электродвижущей силы методом компенсации.....	15
3.1 Общие сведения	15
3.2 Описание лабораторной установки	18
3.3 Программа работы	19
4 Лабораторная работа № 4. Определение емкости конденсатора с помощью электростатического вольтметра.....	20
4.1 Общие сведения	20
4.2 Описание лабораторной установки	21
4.3 Программа работы	22
5 Лабораторная работа № 5. Изучение зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры.....	24
5.1 Общие сведения	24
5.2 Описание лабораторной установки	26
5.3 Программа работы	28
6 Лабораторная работа № 6. Изучение обобщенного закона Ома в интегральной форме для постоянного тока.....	29
6.1 Общие сведения.....	29
6.2 Описание лабораторной установки и метода измерений	31
6.3 Программа работы	33
Список литературы	35

Правила охраны труда и техники безопасности при выполнении лабораторных работ

Лабораторные работы составлены в соответствии с требованиями следующих государственных стандартов: ГОСТ 12.1.01.9–79 *ССБТ. Электробезопасность. Общие требования*; ГОСТ 12.1.030–81 *ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление*.

Перед выполнением лабораторных работ необходимо изучить инструкцию по технике безопасности при работе на установках в лаборатории и расписаться в журнале учета прохождения студентами инструкции по технике безопасности.

Перед началом выполнения лабораторной работы студенты должны ознакомиться со схемой, уяснить порядок включения и выключения аппаратуры, а также порядок выполнения лабораторной работы. В случае обнаруженных повреждений следует немедленно заявить об этом преподавателю, который проводит занятия.

Запрещается:

- производить соединение проводов, находящихся под напряжением;
- самостоятельно производить ремонт аппаратуры и макетов;
- оставлять без надзора включенные лабораторные установки;
- при отключении сетевого питания выдергивать питающий силовой шнур из розетки за провод (необходимо это делать, держась за вилку);
- класть сумки, а также другие личные вещи на приборы, лабораторные установки, устройства.

При возникновении аварийной ситуации или обнаружении искрения или запаха дыма следует немедленно отключить аппаратуру и сообщить преподавателю. После окончания лабораторной работы все схемы, макеты и аппаратура должны быть отключены от сети питания, рабочее место приведено в порядок.

1 Лабораторная работа № 1. Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры

Цель работы: изучить зависимость сопротивления металлов от температуры и определить термический коэффициент сопротивления.

1.1 Общие сведения

В классической теории электропроводности металлов свободные электроны рассматриваются как электронный газ, подчиняющийся законам идеального газа. Если к участку проводника приложена разность потенциалов, то возникает электрическое поле и на хаотическое движение электронов накладывается их упорядоченное движение, возникает электрический ток. При своем движении электроны сталкиваются с положительными ионами, расположенными в узлах кристаллической решетки, и теряют приобретенную энергию. То есть ионы препятствуют упорядоченному движению электронов (протеканию электрического тока). Этим объясняется существование электрического сопротивления проводников. При нагревании проводника тепловое движение ионов становится более интенсивным, число столкновений электронов увеличивается и электрическое сопротивление растет.

Зависимость сопротивления проводника от температуры приближенно выражается формулой

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (1.1)$$

где R_t – сопротивление проводника при t °С;

R_0 – сопротивление проводника при 0 °С;

α – температурный коэффициент сопротивления.

Температурным коэффициентом сопротивления называется отношение изменения сопротивления проводника при его нагревании на 1 °С к сопротивлению проводника при 0 °С.

Строго говоря, величина α зависит от температуры. Поэтому из уравнения (1.1) можно определить лишь среднее значение α в температурном интервале от 0 °С до t °С. Для чистых металлов R изменяется незначительно, поэтому в интервале температур 0 °С...100 °С значение α можно считать постоянным.

Формулу для температурного коэффициента сопротивления можно получить из формулы (1.1), записав ее для двух значений температур R_{t1} и R_{t2} :

$$R_{t1} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_1) \quad \text{и} \quad R_{t2} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_2).$$

Поделив почленно левые и правые части этих равенств, получим

$$\frac{R_{t1}}{R_{t2}} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2},$$

или

$$\alpha = \frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{R_{t_1} t_2 - R_{t_2} t_1}. \quad (1.2)$$

Таким образом, для определения α необходимо измерить сопротивление проводника при различных температурах.

Для измерения сопротивления используются различные способы, в данной работе – два способа.

В первом способе сопротивление измеряется с помощью моста Уитстона, который состоит из реохорда AB , чувствительного гальванометра G и двух сопротивлений – известного R и неизвестного R_x (рисунок 1.1).

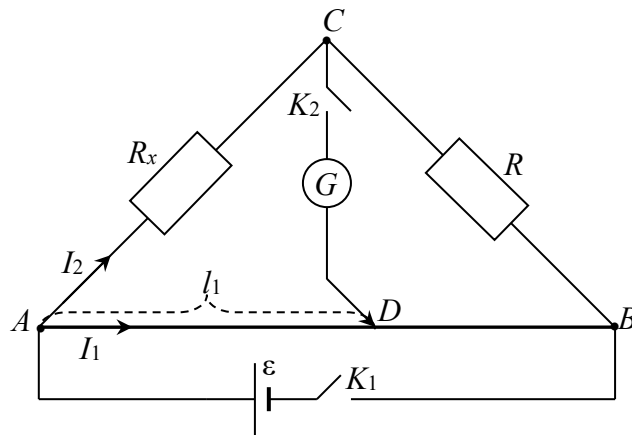


Рисунок 1.1 – Схема моста Уитстона

Величина R подбирается на магазине сопротивлений, и ее можно изменять в широких пределах. Реохорд представляет собой укрепленную на линейке однородную проволоку, вдоль которой может перемещаться скользящий контакт (ползунок) D .

Сначала рассмотрим схему при разомкнутом ключе K_2 .

При замыкании ключа K_1 по проволоке AB потечет ток I_1 и вдоль нее возникнет равномерное падение потенциала от значения φ_A (в точке A) до значения φ_B (в точке B). В цепи ACB пойдет ток I_2 и возникнет падение потенциала от φ_A до φ_C (на сопротивлении R_x) и от φ_C до φ_B (на сопротивление R). Очевидно, что потенциал в точке C имеет промежуточное значение φ_C между значениями φ_A и φ_B ($\varphi_A > \varphi_C > \varphi_B$). Поэтому на участке AB всегда можно найти точку D , потенциал φ_D которой равен потенциалу φ_C в точке C ($\varphi_D = \varphi_C$).

Если при этом условии между точками C и D включить гальванометр (замкнуть ключ K_2), то ток через него не пойдет, т. к. $\varphi_C - \varphi_D = 0$. Такое положение называется равновесием моста.

Для уравновешенного моста на основании закона Ома можно записать следующие соотношения для участков AC , AD и CB , DB соответственно:

$$I_2 \cdot R_x = I_1 \cdot r_{AD}; \quad (1.3)$$

$$I_2 \cdot R = I_1 \cdot r_{DB}. \quad (1.4)$$

Разделив почленно (1.3) на (1.4), получим

$$(R_x / R) = (r_{AD} / r_{DB}). \quad (1.5)$$

Так как сопротивления участков AD и DB пропорциональны их длинам l_1 и l_2 соответственно, то можно записать, что

$$(r_{AD} / r_{DB}) = (l_1 / l_2). \quad (1.6)$$

Подставив (1.6) в (1.5) и выразив R_x , получим

$$R_x = R \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (1.7)$$

Если длина реохорда l , то $l_2 = l - l_1$. Тогда окончательно получим

$$R_x = R \cdot \frac{l_1}{l - l_1}. \quad (1.8)$$

Так как сопротивление реохорда невелико, то мост Уитстона данного типа применяется для измерения небольших сопротивлений.

1.2 Описание лабораторной установки для измерений первым способом

На рисунке 1.2 показан внешний вид лабораторной установки.

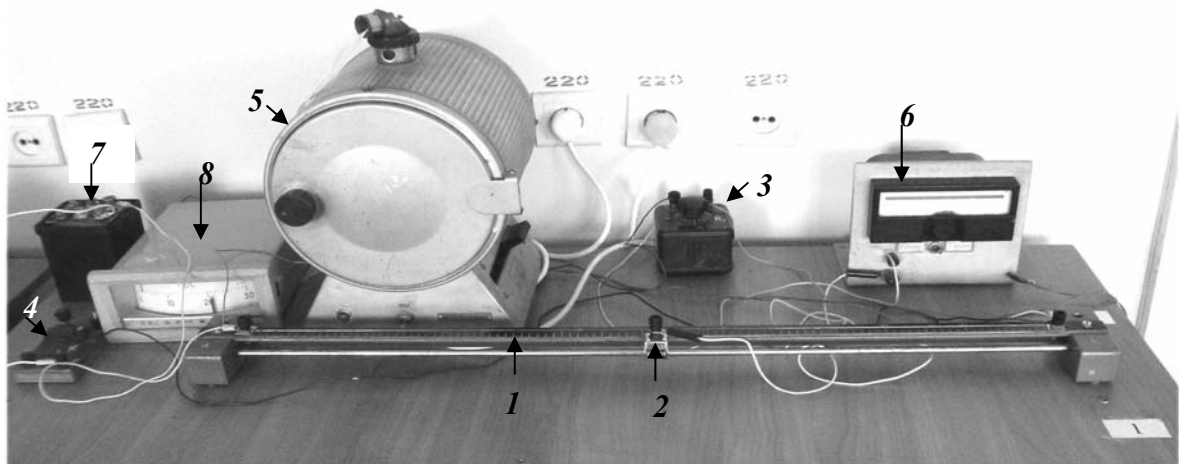


Рисунок 1.2 – Внешний вид лабораторной установки

Исследуемый проводник помещен в нагревательную печь 5 и подключен в одно из плеч моста Уитстона, собранного на реохорде 1. В нижней части печи справа находится регулятор скорости нагрева. Для измерения температуры используется термопара, помещенная внутри печи и подключенная к измерительному прибору 8. В качестве индикатора нуля (G) используется высокочувствительный прибор 6 типа М136/1. На переднем щитке прибора находится переключатель чувствительности («грубо» – «точно»), который при первоначальном включении схемы устанавливается в положение «грубо». Известное сопро-

тивление R выбирается на магазине 3. Источник питания 7 подключается к мосту Уитстона двойным ключом 4. Уравновешивание моста производится перемещением ползунка 2 реохорда.

1.2.1 Программа работы.

1 Собрать схему, изображенную на рисунке 1.1. Цепь включать только после ее проверки лаборантом или преподавателем.

2 На магазине сопротивлений установить сопротивление R в пределах 40...80 Ом (указывается преподавателем).

3 Включить в сеть осветительную систему прибора М136/1. Замкнуть ключи K_1 и K_2 и, перемещая ползунок реохорда, добиться установления риски светового «зайчика» против отметки «0». Установить переключатель прибора в положение «точно» и, уточнив положение ползунка реохорда, определить l_1 . Полученное значение занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений l_1 и вычислений R_x и α

$t, ^\circ\text{C}$	l_1 , число дел.	R_x , Ом	α_2 , град $^{-1}$	$\alpha_{\text{ср}}$, град $^{-1}$	$\alpha_{\text{таб}}$, град $^{-1}$
20					
30					
40					
50					
60					
70					

4 Включить печь и измерить, как указано в п. 3, значения l_1 через каждые 10° в интервале температур 20 °С...70 °С.

5 По формуле (1.8) вычислить значения R_x .

6 Вычислить по формуле (1.2) температурный коэффициент сопротивления α_2 .

7 Построить график зависимости сопротивления проводника R_x от температуры, откладывая по оси X значения температуры t °С, а по оси Y – значения R_x .

8 По графику определить значения R_0 . Для этого продолжить полученную линию графика до пересечения с осью R_x . Точка пересечения даст значение R_0 . Используя полученное значение R_0 и любое выбранное значение R_t , вычислить $\alpha_{\text{ср}}$ по формуле

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{R_t - R_0}{R_0 \cdot t}.$$

Полученное $\alpha_{\text{ср}}$ сравнить с табличным $\alpha_{\text{таб}}$.

1.3 Описание лабораторной установки для измерений вторым способом

На рисунке 1.3 показан внешний вид лабораторной установки. Установка состоит из термошкафа 1, образца 2 и измерительных приборов 3 и 4 (мультиметров). Изучаемый образец нагревается в термошкафу, и с помощью мультиметров измеряются его сопротивление и температура.



Рисунок 1.3 – Внешний вид установки

1.3.1 Программа работы.

1 При необходимости открыть термошкаф и установить образец. Подключить к образцу мультиметры: один для измерения сопротивления образца, другой для измерения температуры. Закрыть термошкаф. На мультиметрах установить необходимые пределы измерения.

2 Подключить термошкаф к однофазной электрической сети 220 В, 50 Гц.

3 Регулятор мощности термошкафа установить в среднее положение.

Внимание! Не нагревать образец выше 150 °С.

4 Снять значения сопротивления R_t через каждые 10° в интервале температур 20 °С...130 °С. Полученные значения занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты измерений

$t, ^\circ\text{C}$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
$R_3, \text{Ом}$												
$R_t, \text{Ом}$												

5 По окончании измерений перевести регулятор мощности термошкафа в исходное положение (повернуть регулятор против часовой стрелки до упора). Отключить термошкаф от питающей сети.

6 По известным среднему радиусу катушки r , числу витков n , сечению S проводника и его удельному сопротивлению ρ вычислить сопротивление проводника при $t = 20 ^\circ\text{C}$:

$$R_{20} = \rho \cdot L / S,$$

где $L = 2\pi \cdot r \cdot n$;

$r = 20$ мм;

$n = 2000$;

$S = 0,35$ мм²;

$\rho = 0,017$ Ом · мм²/м.

7 Вычислить сопротивление R_t проводника при значениях температуры t , приведенных в таблице 1.2:

$$R_t = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t - 20)),$$

где $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

Полученные значения занести в таблицу 1.2.

8 По данным таблицы 1.2 в одной системе координат построить графики зависимости сопротивления проводника R_s и R_t от температуры, откладывая по оси X значения температуры t °С, а по оси Y – значения R_s и R_t . Сравнить полученные графики, сделать вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Объяснить механизм проводимости в металлах.
- 2 От каких факторов зависит сопротивление проводника?
- 3 Почему сопротивление металлов увеличивается с возрастанием температуры?
- 4 Что называется температурным коэффициентом сопротивления?
- 5 Какие основные законы используются в работе?
- 6 Где применяется на практике зависимость R от t ?
- 7 Что такое R_0 ? Как эта величина определяется в работе?

2 Лабораторная работа № 2. Определение энергии ионизации атомов аргона

Цель работы: определить энергию ионизации атомов аргона путем исследования вольт-амперной характеристики тиратрона с аргоновым наполнением.

2.1 Общие сведения

Ионизация – это процесс, при котором один или несколько электронов либо освобождаются из атомов или молекул нейтрального газа, либо присоединяются к ним. Чтобы из нейтрального атома удалить электрон, требуется затрата энергии. Минимальное значение такой энергии называется энергией ионизации атома. Когда атом нейтрального газа приобретает один или несколько электронов, он становится отрицательным ионом. Число свободных электронов в газе уменьшится, и поскольку подвижность отрицательных ионов много меньше подвижности электронов, то электропроводность газа снижается. Отри-

цательные ионы образуются не во всех газах. В водороде, азоте и инертных газах отрицательные ионы таким образом не образуются. Кислород, хлор, пары воды имеют высокое электронное сродство и в них легко образуются отрицательные ионы.

Молекула или атом газа может потерять электрон и стать положительным ионом с помощью следующих процессов:

- 1) при неупругом соударении с электроном, ионом или атомом нейтрального газа;
- 2) при соударении с передачей энергии от одного атома к другому;
- 3) под действием электромагнитного излучения (фотоионизация).

Неупругие соударения. Вероятность ионизации атома, происходящей в результате неупругих соударений с другими атомами мала, ее можно не учитывать, за исключением области очень высоких температур. Неупругое состояние при столкновении между электроном и атомом газа приводит к образованию иона только в случае, если кинетическая энергия электрона больше потенциальной энергии, необходимой для ионизации газа.

Если суммарная энергия сталкивающихся частиц меньше энергии ионизации одного из сталкивающихся атомов, то произойдет возбуждение этого атома.

Передача энергии. Процесс наблюдается обычно в смешанных газах, например, аргоне и неоне. Атом аргона имеет энергию ионизации 15,7 эВ, неона – 21,6 эВ. Атом неона может передавать энергию атому аргона. В результате ионизации которого образуется ион и свободный электрон и выделится некоторое количество энергии.

Фотоионизация. Этот процесс играет существенную роль в газовых разрядах, особенно в газах низкого давления. Под действием сильного электромагнитного излучения образуется большое число свободных электронов.

Для количественной характеристики ионизирующей способности электронов британский физик и математик Джон Таунсенд (1868–1957) ввел два «коэффициента ионизации» α и β . Первый из них определяется как среднее число ионов одного знака, производимое электроном на единице своего пути. Коэффициент β имеет такой смысл, но характеризует ионизирующую способность положительных ионов. Коэффициент ионизации электронами α обычно значительно превосходит коэффициент ионизации β ($\alpha \gg \beta$). Следовательно, ионизацией атомов положительными ионами во многих случаях можно пренебречь по сравнению с ионизацией ударами электронов.

Процессы ионизации атомов инертных газов можно исследовать при снятии вольт-амперной характеристики газонаполненных триодов (тиратронов). Конструкция тиратрона представлена на рисунке 2.1.

Все три электрода находятся в трубке, наполненной газом. Давление газа составляет примерно 0,01 мм рт. ст.

На рисунке 2.2 представлена схематически пусковая характеристика тиратрона, если на сетку горячего катода подать положительный импульс напряжения. I_a – ток в анодной цепи тиратрона, V_q – напряжение на сетке.

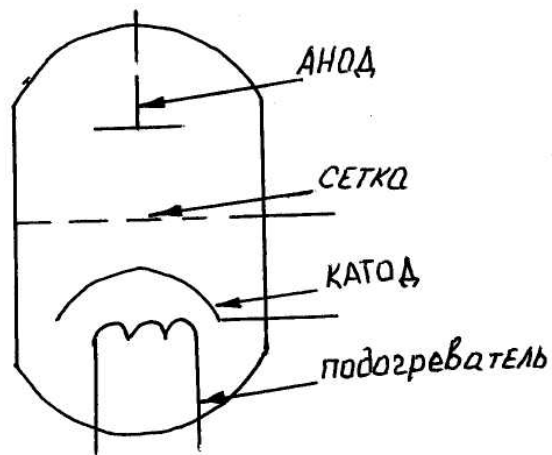


Рисунок 2.1 – Устройство тиратрона

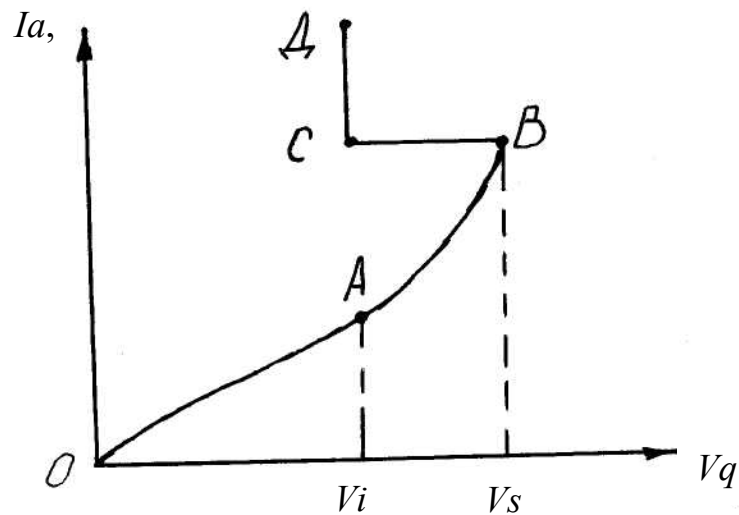


Рисунок 2.2 – Пусковая характеристика тиратрона

Участок OA характеризуется упругими столкновениями электронов с нейтральными атомами газа. На этом участке $I_a \sim V_q^{3/2}$. Эта зависимость носит название «Закона трех вторых». При небольших значениях напряжения «Закон трех вторых» дает заниженное значение термоэлектронного тока, т. к. не учитывается тепловой разброс скоростей электронов. При напряжении V_i в газе образуются, за счет ионизации электронным ударом, положительные ионы, которые изменяют распределение заряда в лампе. Ионизация в этом случае осуществляется наиболее быстрыми (обладающими максимальной кинетической энергией) электронами. При напряжении V_s в газе наступает пробой и напряжение падает до величины, необходимой для поддержания разряда. Ток резко возрастает (участок CD). Разность потенциалов между электродами, при котором наступает пробой газа носит название потенциала зажигания. Согласно экспериментальному закону Пашена потенциал зажигания V_s есть функция произведения давления газа P на расстояние между электродами d .

Типичная кривая Пашена для воздуха показана на рисунке 2.3. Энергия

электронов, необходимая для ионизации атомов газа Wi складывается из энергии, полученной при ускорении электронов в электрическом поле сетки eVq , и кинетической энергии, получаемой электронами при термоэлектронной эмиссии с поверхности горячего катода $E_{k \max}$.

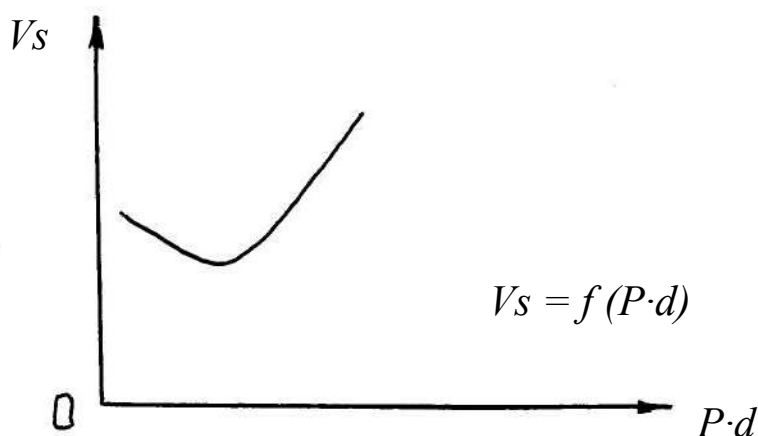


Рисунок 2.3 – Кривая Пашена для воздуха

Для тиратрона с аргоновым наполнением и оксидным катодом, имеющим высокую эмиссионную способность при рабочей температуре 800 °С...900 °С, максимальные кинетические энергии электронов при различных токах накала катода представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Максимальные кинетические энергии электронов при различных токах накала катода тиратрона с аргоновым наполнением

$I_n, \text{ А}$	$E_{k \max}, \text{ эВ}$
0,40	2,7
0,45	5
0,50	6,3
0,55	7,5

Используя данные таблицы 2.1, по формуле

$$Wi = Vi + E_{k \max} \quad (2.1)$$

при различных токах накала можно рассчитать энергию ионизации атомов аргона.

2.2 Описание лабораторной установки

На рисунке 2.4 представлена схема лабораторной установки.

К клеммам 1 и 2 подключены миллиамперметр и реостат R_1 (15 Ом) для регулировки тока накала. К клеммам 3, 4 и 5 подключен потенциометр с сопротивлением $R_2 = 5000$ Ом для регулировки напряжения Vq на сетке тиратрона.

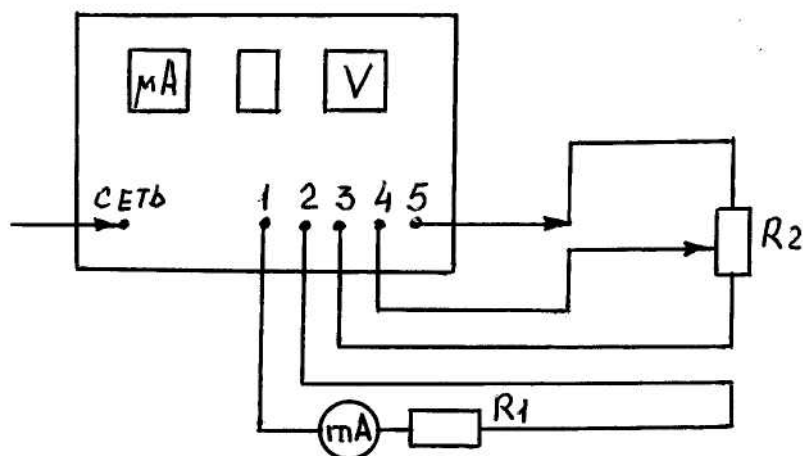


Рисунок 2.4 – Схема лабораторной установки

2.3 Программа работы

2.3.1 После проверки схемы преподавателем установить реостат R_1 и потенциометр R_2 в среднее положение. Включить установку в сеть и дать прогреться в течение 2...3 мин.

2.3.2 Установить потенциометром R_2 напряжение на сетке $V_q = 0$ В, установить реостатом R_1 ток накала тиратрона $I_n = 400$ мА. Дать стабилизироваться температуре катода 2–3 мин.

2.3.3 Изменяя напряжение V_q (потенциометром R_2) на сетке тиратрона от 0 В через 1 В до значения, обеспечивающего $I_a = 1000$ мкА, снять значения анодного тока I_a . Результаты измерений занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты измерений

Номер измерения	Ток накала I_n , мА	Напряжение на сетке V_q , В	Анодный ток I_a , мкА

2.3.4 Устанавливая токи накала I_n равными 450 и 500 мА, повторить измерения согласно пп. 2.3.2 и 2.3.3.

2.3.5 По результатам измерений построить графики зависимости анодного тока I_a от напряжения на сетке V_q при трех значениях тока накала I_n .

2.3.6 По графикам определить значение V_i (напряжение начала ионизации в газе, см. рисунок 2.2) при различных токах накала.

2.3.7 По формуле (2.1) и используя данные таблицы 2.1 определить энергию ионизации атомов аргона.

2.3.8 На участках ОА графиков убедиться в выполнении «Закона трех вторых» $I_a \sim V_q^{3/2}$.

Контрольные вопросы

- 1 Что называется энергией ионизации атомов?
- 2 Что такое потенциал зажигания лампы?
- 3 В чем состоит закон Пашена?
- 4 Что такое тиратрон?
- 5 Опишите процессы, приводящие к пробое в газе.
- 6 Почему наступает пробой, если на сетку тиратрона подать положительный импульс напряжения?

3 Лабораторная работа № 3. Измерение электродвижущей силы методом компенсации

Цель работы: изучить метод компенсации и экспериментально измерить ЭДС гальванических элементов.

3.1 Общие сведения

Одним из условий возникновения упорядоченного движения электрических зарядов в проводнике является наличие в нём электрического поля, способного перемещать заряды.

Потенциальные силы электростатического поля не могут поддерживать постоянный ток в цепи, т. к. протекание тока неизбежно приводит к выравниванию потенциалов между заряженными проводниками. Для поддержания электрического тока в цепи необходимо наличие источника энергии (источника тока) неэлектростатической природы. Основной величиной, характеризующей такой источник тока, является его электродвижущая сила (ЭДС).

Электродвижущей силой называют физическую величину, численно равную работе сторонних (не потенциальных) сил по перемещению положительного единичного заряда на отдельном участке или по всей цепи.

Сторонние силы приводят в движение заряженные частицы внутри генераторов, гальванических элементов, аккумуляторов и других источников. Природа сторонних сил может быть различной: в генераторах – это силы со стороны вихревого электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля, или сила Лоренца, действующая со стороны магнитного поля на электроны в движущемся проводнике; в гальванических элементах – это силы, возникающие за счёт энергии химических реакций между электродами и электролитами.

По закону Ома для полной цепи сила тока

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (3.1)$$

откуда для ЭДС получим

$$\varepsilon = IR + Ir, \quad (3.2)$$

где IR – напряжение на внешнем участке цепи (на нагрузке);

Ir – напряжение на внутреннем участке цепи (на электролите).

При подключении вольтметра к клеммам источника тока он показывает напряжение U на внешнем участке цепи:

$$U = \varepsilon - Ir. \quad (3.3)$$

Из формулы (3.3) видно, что напряжение U , измеряемое вольтметром, может быть равно ЭДС только в том случае, если $r = 0$ или $I = 0$. Однако внутреннее сопротивление источника тока всегда отлично от нуля ($r \neq 0$). Следовательно, в момент измерения ЭДС с помощью вольтметра ток через элемент должен быть равен нулю ($I = 0$). Но в этом случае и вольтметр ничего не покажет. Поэтому ЭДС источников тока измеряют не вольтметрами, а методом компенсации.

Сущность метода компенсации при измерении ЭДС заключается в подборе на участке электрической цепи такого напряжения, которое равно ЭДС исследуемого источника тока. Ниже поясняется метод компенсации.

Схема электрической цепи для определения ЭДС методом компенсации изображена на рисунке 3.1.

При замыкании ключа K_1 по проволоке AB потечет ток I_1 , и вдоль нее возникнет равномерное падение потенциала от значения φ_A (в точке A) до значения φ_B (в точке B). Если теперь замкнуть ключ K_2 и ключом K_3 подключить источник ε_X , то в цепи $A-\varepsilon_X-R-G-D$ пойдет ток I_2 . В этой цепи действуют ЭДС источника ε_X и напряжение $U_{AD} = \varphi_A - \varphi_D$ на участке AD , обусловленное током I_1 . Поэтому ток I_2 определяется законом Ома в интегральной форме для неоднородной цепи:

$$I_2 = \frac{U_{AD} - \varepsilon_X}{r_X + R + r_G}, \quad (3.4)$$

где r_X – внутреннее сопротивление гальванического элемента с неизвестной ЭДС;

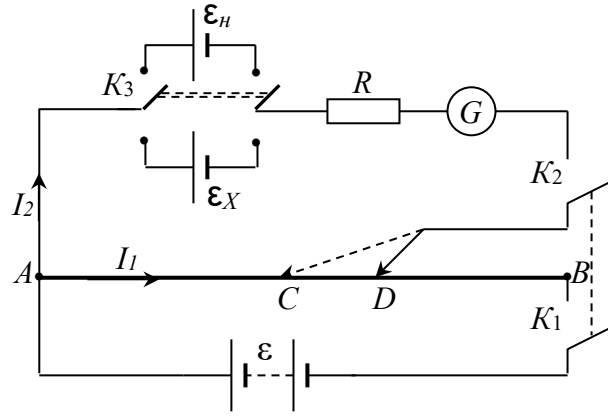
r_G – сопротивление гальванометра G ;

R – ограничительное сопротивление.

В формуле (3.4) величина ε_X взята со знаком $(-)$, т. к. источники ε_X и ε включены навстречу друг другу и ЭДС источника ε_X препятствует протеканию тока I_2 . Из формулы видно, что в зависимости от соотношения величин U_{AD} и ε_X ток I_2 может протекать в одном и в другом направлениях.

Значение U_{AD} зависит от положения ползунка реохорда. Поэтому, перемещая ползунок реохорда, можно добиться совпадения значений U_{AD} и ε_X , т. е. компенсации ε_X . В этом случае ток I_2 будет равен нулю, и при замкнутых ключах K_1 , K_2 и K_3 стрелка гальванометра установится на нуле.

Равенство $U_{AD} = \varepsilon_X$ может быть достигнуто лишь при условии, когда величина ЭДС основного источника ε будет больше ЭДС исследуемого источника ε_X . В противном случае максимальное напряжение на реохорде U_{AB} будет меньше ε_X и компенсация не будет достигнута.



G – нуль-гальванометр; AB – реохорд с подвижным контактом D (ползунком); ε_x – исследуемый элемент; ε_n – нормальный элемент Вестона

Рисунок 3.1 – Схема лабораторной установки

Получим формулу для определения ЭДС методом компенсации.

Напряжение на участке AD реохорда определяется сопротивлением R_{AD} и значением силы тока I_1 , текущего по этому участку:

$$U_{AD} = I_1 \cdot R_{AD}. \quad (3.5)$$

Поэтому при $U_{AD} = \varepsilon_x$, $I_2 = 0$ из формулы (3.5) следует, что

$$I_1 \cdot R_{AD} = \varepsilon_x. \quad (3.6)$$

Это значит, что напряжение U_{AD} на участке AD компенсирует ЭДС исследуемого элемента ε_x .

Заменив исследуемый элемент эталонным ε_n (с известной ЭДС) и перемещая ползунок реохорда, можно найти новое значение напряжения U_{AC} на участке AC , которое будет компенсировать ε_n . В этом случае условие компенсации будет иметь вид

$$I_1 \cdot R_{AC} = \varepsilon_n. \quad (3.7)$$

Сила тока на участке AB остаётся прежней, т. к. в ветви AGC тока нет.

Разделив почленно (3.6) на (3.7), получим

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \cdot \frac{R_{AD}}{R_{AC}}. \quad (3.8)$$

Для калиброванной проволоки реохорда сопротивление участков AD и AC пропорционально их длинам. Поэтому

$$\frac{R_{AD}}{R_{AC}} = \frac{l_1}{l_2}, \quad (3.9)$$

где l_1, l_2 – длины участков AD и AC в делениях линейки реохорда.

Подставив (3.9) в (3.8), получим искомую формулу для ε_x :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (3.10)$$

Таким образом, зная значение ε_n и измерив $AD = l_1$ и $AC = l_2$, по формуле (3.10) можно найти искомую величину ε_x .

3.2 Описание лабораторной установки

На рисунке 3.2 показан внешний вид лабораторной установки.

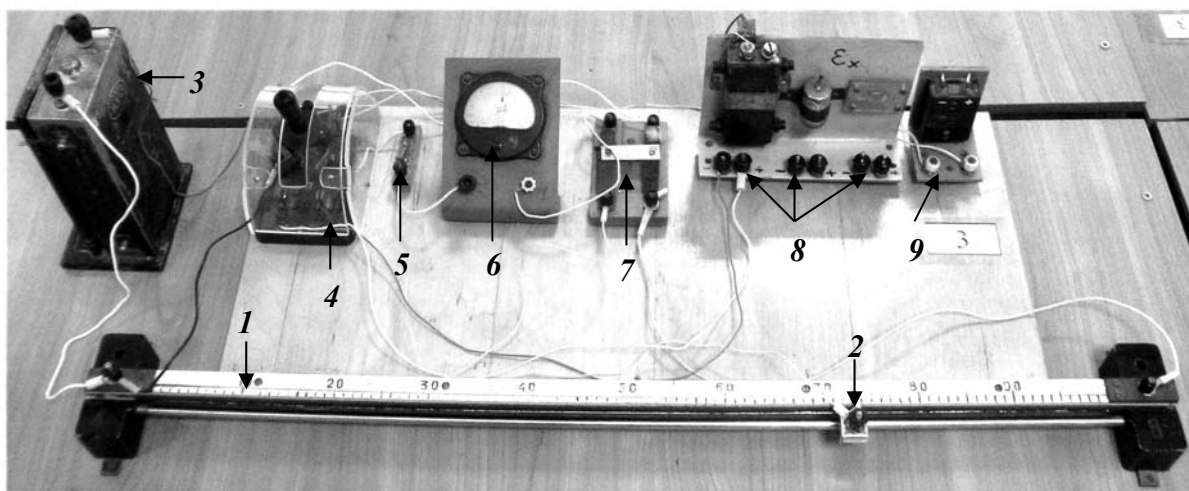


Рисунок 3.2 – Внешний вид лабораторной установки

Проволока реохорда AB натянута на масштабную линейку (позиция 1), что позволяет непосредственно отсчитывать длины l_1 и l_2 . Ключи K_1 и K_2 объединены (позиция 7), поэтому возможно одновременно замыкать и размыкать обе цепи на короткое время во избежание быстрого разряда батареи ε (позиция 3) и поляризации элементов ε_x (позиция 8), ε_n (позиция 9). С этой же целью защиты элемента и гальванометра от сильных токов в момент измерения последовательно с гальванометром (позиция 6) включено ограничивающее сопротивление R (позиция 5). Исследуемый ε_x и нормальный ε_n элементы включаются в цепь с помощью ключа K_3 (позиция 4). Компенсация достигается перемещением ползунка реохорда (позиция 2).

В работе применяется высокочувствительный гальванометр с нулевой отметкой, находящейся посередине шкалы. В качестве эталонного источника ЭДС используется нормальный ртутно-кадмиевый элемент Вестона. ЭДС нормального элемента малочувствительна к изменениям температуры и очень мало изменяется со временем, т. к. мала поляризация.

При $t = 20^\circ \text{C}$ $\varepsilon_n = 1,0183 \text{ В}$. Ввиду постоянства ЭДС нормальный элемент удобно использовать в качестве эталона. Сила тока через элемент Вестона

не должна превышать $10^{-6} \dots 10^{-5}$ А. Этот элемент применяется исключительно в компенсационных схемах.

3.3 Программа работы

3.3.1 Ознакомиться с приборами и собрать цепь по схеме (см. рисунок 3.1).

Убедиться, что исследуемый элемент и аккумулятор подключены одноимёнными полюсами к точке *A* реохорда. До проверки схемы лаборантом или преподавателем ключи не замыкать.

3.3.2 Расположить ползунок реохорда примерно на середине линейки и с помощью переключателя K_3 включить в цепь испытуемый элемент ε_{x1} .

3.3.3 Замкнуть на короткое время цепь двоянным ключом K_1-K_2 и, передвигая ползунок реохорда, найти такое его положение, при котором стрелка гальванометра устанавливается на нуль.

3.3.4 Измерить длину плеча l_1 реохорда между точками *A* и *D*. На линейке реохорда одно деление не равно 1 см, поэтому отсчёт следует вести в делениях. Опыт повторить 4–5 раз и найти среднее значение $\langle l_1 \rangle$.

3.3.5 С помощью переключателя K_3 включить в цепь нормальный элемент ε_n и, следуя пп. 3.3.3 и 3.3.4, определить длину плеча $\langle l_2 \rangle$ реохорда.

3.3.6 Вычислить ЭДС исследуемого элемента ε_{x1} по формуле (3.10).

3.3.7 Повторить пп. 3.3.2–3.3.6 для элементов ε_{x2} и ε_{x3} .

3.3.8 Все измеренные и вычисленные значения величин занести в таблицу 3.1, продолжив её ещё для двух неизвестных элементов.

Таблица 3.1 – Результаты измерений электродвижущей силы гальванических элементов

Номер элемента	l_1 , дел.	l_2 , дел.	$\langle l_1 \rangle$, дел.	$\langle l_2 \rangle$, дел.	ε_n , В	ε_{x1} , В

Контрольные вопросы

- 1 Что такое ЭДС?
- 2 Какова природа сторонних сил в источниках тока?
- 3 Можно ли измерить ЭДС с помощью вольтметра?
- 4 В чём заключается метод компенсации?
- 5 Запишите и поясните закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме.
- 6 Выведите формулу для нахождения ε_x .
- 7 Можно ли измерить ε_x , если $\varepsilon_x > \varepsilon$?

4 Лабораторная работа № 4. Определение емкости конденсатора с помощью электростатического вольтметра

Цель работы: экспериментально определить электрические емкости конденсаторов и проверить законы их параллельного и последовательного соединения.

4.1 Общие сведения

Конденсатором называется система двух близкорасположенных проводников. При этом проводники имеют такие формы, что при сообщении им равных по значению, но противоположных по знаку зарядов, поле, создаваемое этой системой, сосредоточено в области пространства, ограниченной проводниками. Эти проводники называются обкладками (или пластинами) конденсатора.

Электрической емкостью называется физическая величина, равная отношению заряда Q , накопленного в конденсаторе и разности потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ между его обкладками:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U}. \quad (4.1)$$

Из формулы (4.1) следует физический смысл величины: *электрическая емкость численно равна заряду, который нужно сообщить конденсатору, чтобы его разность потенциалов увеличить на 1 В.*

Емкость плоского конденсатора определяется площадью его обкладок и величиной зазора между ними, а также диэлектрической проницаемостью среды между обкладками.

Один из способов определения емкости конденсатора основан на законе сохранения электрического заряда: *алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы не изменяется со временем.*

Рассматривая конденсатор как изолированную систему, получим формулу для определения его емкости.

Эталонный конденсатор с известной емкостью C_0 зарядим до разности потенциалов U_0 (рисунок 4.1). Затем, отключив его от источника напряжения, быстро подключим к нему параллельно конденсатор неизвестной емкости C_x . Тогда первоначальный заряд Q_0 эталонного конденсатора распределится между обоими конденсаторами и разность потенциалов между обкладками конденсаторов станет равной U_1 . Пренебрегая потерями в момент соединения конденсаторов, закон сохранения заряда можно записать в виде

$$Q_0 = Q_1 + Q_2, \quad (4.2)$$

где Q_1 – заряд, оставшийся на эталонном конденсаторе C_0 после подключения к нему конденсатора C_x ;

Q_2 – заряд, перешедший на конденсатор C_x .

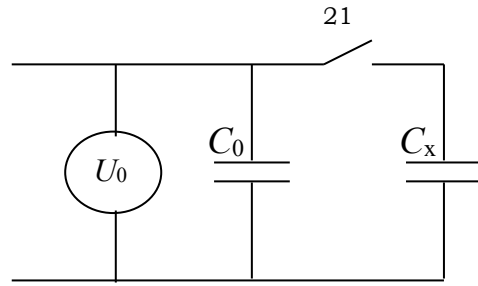


Рисунок 4.1 – Пояснение сущности метода измерения ёмкости

Выразим заряды в формуле (4.2) через емкости и разности потенциалов с помощью формулы (4.1):

$$Q_0 = C_0 U_0; \quad Q_1 = C_0 U_1; \quad Q_2 = C_x U_1.$$

Подставив их в формулу (4.2), получим

$$C_0 U_0 = C_0 U_1 + C_x U_1. \quad (4.3)$$

Из (4.3) выразим емкость неизвестного конденсатора и получим расчетную формулу

$$C_x = \frac{C_0 (U_0 - U_1)}{U_1}. \quad (4.4)$$

4.2 Описание лабораторной установки

Разность потенциалов между обкладками конденсаторов измеряется с помощью электростатического вольтметра. Измерительный механизм электростатического вольтметра состоит из подвижного и неподвижного электродов, изолированных друг от друга. Поэтому при измерениях постоянного напряжения ток через вольтметр не протекает. Так как емкость вольтметра по сравнению с емкостями, используемыми в работе, ничтожно мала, то погрешностью, вносимой вольтметром, можно пренебречь. На рисунке 4.2 показана электрическая схема установки. На рисунке 4.3 представлен внешний вид лабораторной установки.

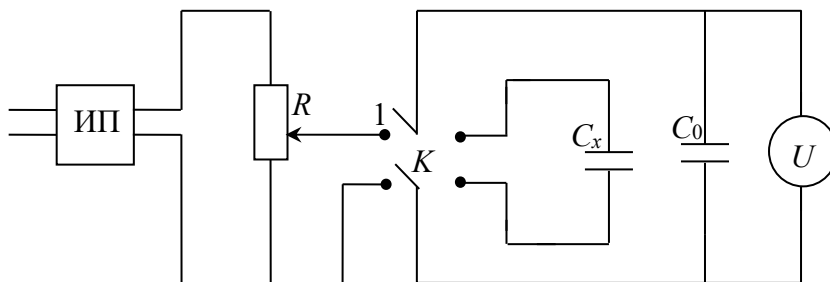
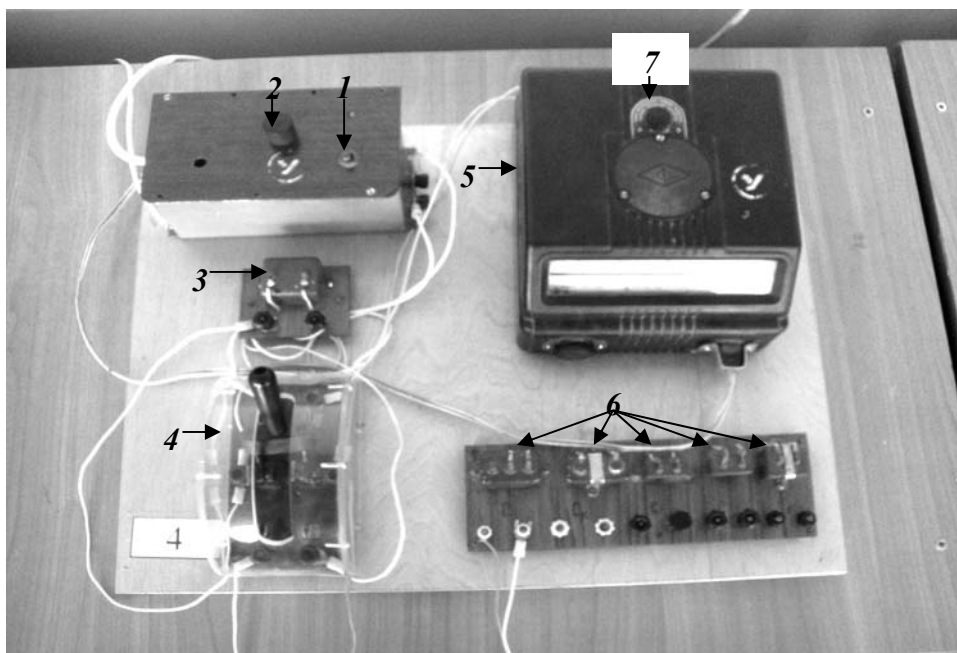


Рисунок 4.2 – Схема лабораторной установки



1 – тумблер источника питания; 2 – потенциометр R ; 3 – эталонный конденсатор; 4 – ключ K ; 5 – электростатический вольтметр; 6 – набор исследуемых конденсаторов; 7 – корректор

Рисунок 4.3 – Внешний вид лабораторной установки

4.3 Программа работы

Ознакомиться с приборами и собрать схему согласно рисунку 4.2. Номера исследуемых конденсаторов выбираются по указанию преподавателя. До проверки собранной цепи преподавателем или лаборантом источник питания не включать.

Включить освещение шкалы вольтметра. Проверить, находится ли «световой зайчик» на нуле. Если нет, то вместе с лаборантом или преподавателем установить его корректором на нулевую отметку шкалы.

4.3.1 Определение емкости конденсаторов.

4.3.1.1 Рукоятку потенциометра поставить в левое крайнее положение. Замкнуть ключ K на источник (на рисунке 4.2 положение от себя).

4.3.1.2 Включить выпрямитель в сеть и с помощью потенциометра R увеличить напряжение на эталонном конденсаторе до 90 В. Снять показания вольтметра U_0 .

4.3.1.3 Перевести ключ K в противоположное положение, тем самым отключив конденсатор C_0 от источника питания и подключив его к конденсатору с неизвестной емкостью C_x . Снять показания вольтметра U_1 .

4.3.1.4 Измерения проделать не менее трех раз, подавая различные напряжения (90, 100, 110 В) на эталонный конденсатор. При этом после каждого измерения конденсатор неизвестной емкости обязательно разряжать. Показания

вольтметра занести в таблицу 4.1, которую продолжить для двух других конденсаторов.

4.3.1.5 По формуле (4.4) подсчитать емкость C_x . Найти среднее значение $\langle C_x \rangle$.

Таблица 4.1 – Результаты измерения емкости отдельных конденсаторов

Номер конденсатора	Номер измерения	U_0 , В	U_1 , В	C_x , мкФ	$\langle C_x \rangle$, мкФ

4.3.2 *Определение емкости батареи параллельно соединенных конденсаторов.*

4.3.2.1 Соединить два любых из заданных конденсаторов параллельно (рисунок 4.4, а).

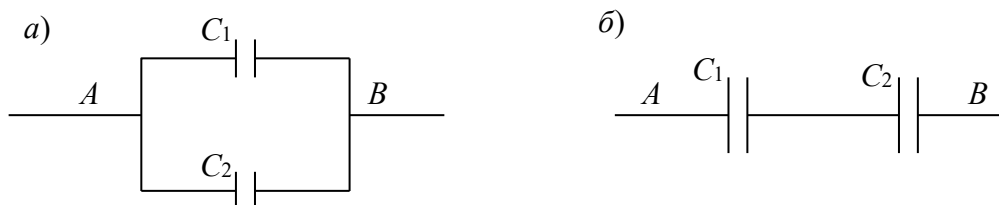


Рисунок 4.4 – Схемы параллельного и последовательного соединения конденсаторов

Определить емкость батареи так, как указано в пп. 4.3.1.2–4.3.1.5. Сравнить полученный результат с емкостью батареи, вычисленной по формуле

$$C'_{\text{бат}} = C_{1X} + C_{2X}.$$

4.3.2.2 Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты измерений емкости параллельно соединенных конденсаторов

Номер конденсатора	Номер измерения	U_0 , В	U_1 , В	$C_{\text{БАТ}}$, мкФ	$\langle C_{\text{БАТ}} \rangle$, мкФ	$C'_{\text{БАТ}}$, мкФ

4.3.3 *Определение емкости батареи последовательно соединенных конденсаторов.*

4.3.3.1 Соединить два любых из заданных конденсаторов последовательно (рисунок 4.4, б). Определить емкость батареи так, как указано в пп. 4.3.1.2–4.3.1.5. Сравнить полученный результат с емкостью батареи, вычисленной по формуле

$$\frac{1}{C'_{\text{БАТ}}} = \frac{1}{C_{1X}} + \frac{1}{C_{2X}}.$$

4.3.3.2 Соединить три конденсатора последовательно и определить емкость батареи. Сравнить полученный результат с емкостью батареи, вычисленной по формуле

$$\frac{1}{C'_{\text{БАТ}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_{ix}}.$$

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу, аналогичную таблице 4.2.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое электрическая емкость конденсатора? От чего она зависит и в каких единицах измеряется?
- 2 В чем заключается сущность метода измерения, использованного в данной лабораторной работе?
- 3 Какой закон положен в основу вывода рабочей формулы? Вывести рабочую формулу.
- 4 Какой формулой определяется емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов?
- 5 Какой формулой определяется емкость батареи последовательно соединенных конденсаторов?

5 Лабораторная работа № 5. Изучение зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры

Цель работы: изучить зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры.

5.1 Общие сведения

Существует группа веществ, которые в отличие от большинства диэлектриков (например, слюды, парафина, полистирола, фторопласта и др.) могут обладать спонтанной (самопроизвольной) поляризацией в отсутствие внешнего электрического поля. Это явление было открыто первоначально для сегнетовой соли $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$. В связи с этим подобные вещества получили название сегнетоэлектриков. Первое детальное исследование электрических свойств солей было осуществлено советскими физиками И. В. Курчатовым и П. П. Кобеко. Очень важное практическое значение имеет открытый советским физиком Б. И. Вулом и его сотрудниками сегнетоэлектрик – метатитанат бария (BaTiO_2). Сегнетоэлектриками являются титанат бария BaTiO_3 , дигидрофосфат калия KH_2PO_4 и др.

Вещества, обладавшие сегнетоэлектрическими свойствами, отличаются от остальных диэлектриков рядом характерных особенностей.

Во-первых, если у обычных диэлектриков величина диэлектрической проницаемости ϵ составляет несколько единиц, то у сегнетоэлектриков значение ϵ может достигать около нескольких тысяч. Вещества, обладающие сегнетоэлектрическими свойствами, могут быть использованы в качестве диэлектрика конденсатора. Напомним, что емкость плоского конденсатора определяется формулой

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}. \quad (5.1)$$

Следовательно, при одинаковой площади S обкладок и одинаковом расстоянии d между обкладками, конденсатор с сегнетоэлектриком в качестве диэлектрика будет обладать в тысячи раз большей емкостью или (при данной емкости) существенно меньшими габаритами по сравнению со слюдяными, бумажными и т. п. конденсаторами.

Во-вторых, диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков зависит от температуры. Характер этой зависимости показан на рисунке 5.1, а.

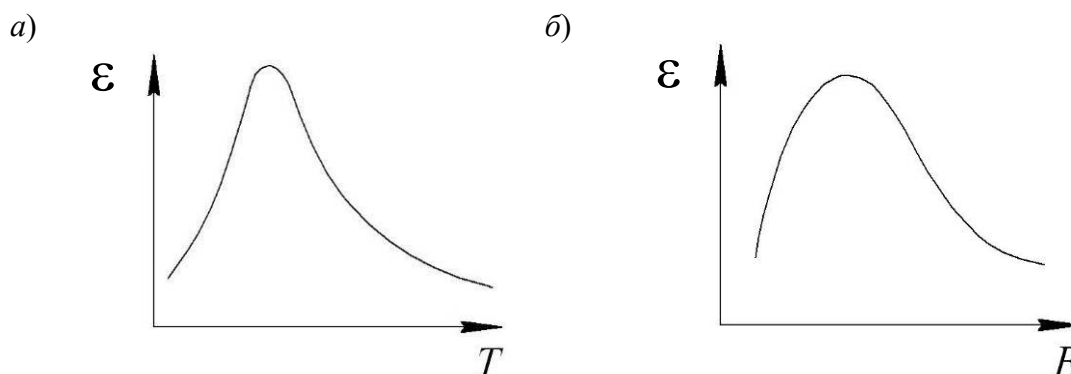


Рисунок 5.1 – Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры (а) и напряженности электрического поля в веществе (б)

В-третьих, величина ϵ сегнетоэлектриков является функцией напряжённости E поля в веществе: $\epsilon = \epsilon(E)$ (рисунок 5.1, б). В связи с этим зависимость электрического смещения $\vec{D}$ от $\vec{E}$ при не очень больших полях является нелинейной. При достаточно больших значениях $\vec{E}$ происходит насыщение – вектор поляризации $\vec{P}$ перестает изменяться с ростом $\vec{E}$.

В-четвертых, при изменении направления поля в сегнетоэлектриках значения вектора поляризации $\vec{P}$, а следовательно, и $\vec{D}$ ($\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$) отстают от напряженности поля $\vec{E}$, в результате чего $\vec{P}$ и $\vec{D}$ определяются не только величиной $\vec{E}$ в данный момент, но и предшествующими значениями $\vec{E}$, т. е. имеет место электрический гистерезис (рисунок 5.2).

Основные свойства сегнетоэлектриков (большое значение ϵ , насыщение при сравнительно слабых полях, зависимость от температуры, гистерезисные

явления) объясняются спонтанной поляризацией образцов. Кристаллы сегнетоэлектриков состоят из самопроизвольно поляризованных до насыщения областей, называемых доменами. В пределах доменов дипольные моменты молекул спонтанно устанавливаются параллельно друг другу. При отсутствии внешнего поля векторы поляризации доменов ориентированы хаотично, и суммарный электрический момент образца равен нулю. При наложении электрического поля векторы поляризации доменов ориентируются в направлении поля, и образец приобретает заметный электрический момент даже в сравнительно слабых полях. Под действием внешнего поля момент домена поворачивается как целое, устанавливаясь по направлению поля.

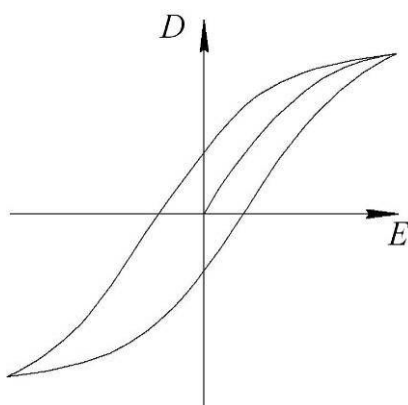


Рисунок 5.2 – Зависимость электрического смещения от напряженности электрического поля в веществе

Для каждого сегнетоэлектрика существует температура, выше которой он утрачивает свои свойства и становится обычным диэлектриком. Эта температура Θ носит название точки Кюри. При $T > \Theta$ тепловое движение нарушает спонтанную ориентацию дипольных моментов внутри доменов и сегнетоэлектрические свойства исчезают.

Как уже отмечалось, применение сегнетоэлектриков в качестве диэлектрика конденсатора позволяет создавать конденсаторы малых размеров с достаточно большой емкостью. Зависимость емкости конденсаторов с сегнетоэлектрическим диэлектриком от приложенного напряжения используют при создании конденсаторов с нелинейной характеристикой – варикондов. Вариконды широко применяются в радиотехнике: в стабилизаторах напряжений, в диэлектрических усилителях, в сенсорных блоках телевизоров и т. д.

5.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка конструктивно выполнена в виде двух блоков: электрической печи с помещённым в нее образцом сегнетоэлектрика и измерительного блока (рисунок 5.3).

Образец представляет собой прямоугольную пластину титаната бария с напыленными серебряными пленками. То есть образец вместе с пленками образует плоский конденсатор, в котором диэлектриком является титанат бария.

Упрощенная электрическая схема установки показана на рисунке 5.4.

Понижающий трансформатор Tr включается в сеть переменного тока. Со вторичной обмотки трансформатора снимается напряжение $U_0 = 20 \dots 32$ В, которое подается на образец. Микроамперметр с мостиковым выпрямителем служит для измерения тока в цепи. Падение напряжения на микроамперметре пренебрежимо мало по сравнению с напряжением U_0 . Температура образца контролируется мультиметром, термопара которого находится в непосредственном контакте с исследуемым образцом.

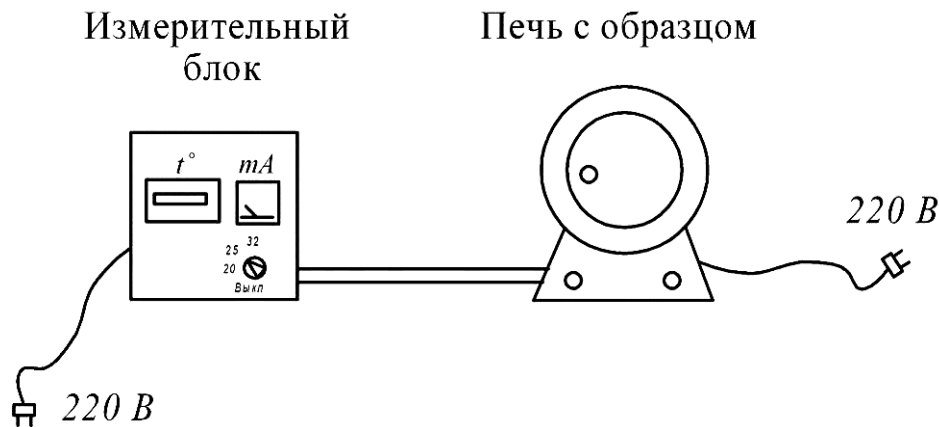


Рисунок 5.3 – Схема лабораторной установки

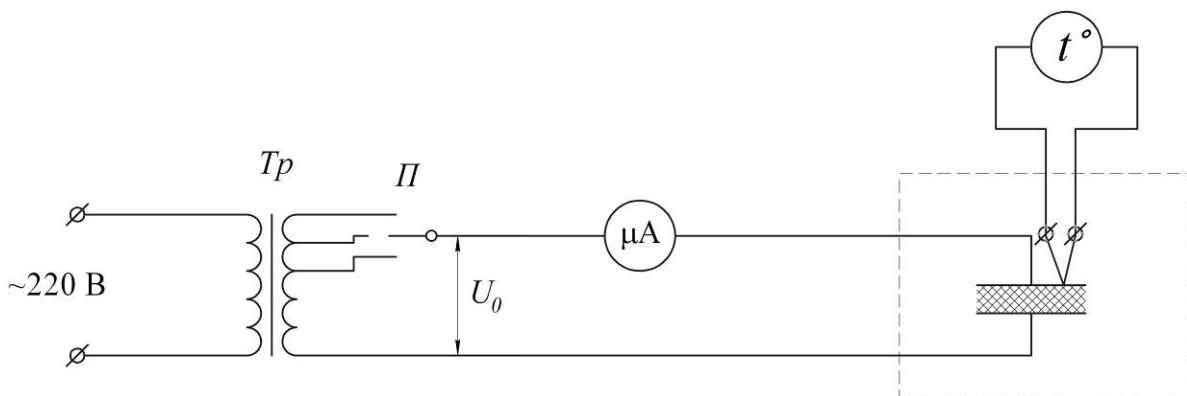


Рисунок 5.4 – Электрическая схема лабораторной установки

Электрическое сопротивление X_c конденсатора емкостью C переменному току с частотой f вычисляется по формуле

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}. \quad (5.2)$$

Так как сила тока в цепи конденсатора (образца) определяется законом Ома, то с учетом (5.2) получим

$$I = \frac{U_0}{X_c} = U_0 2\pi f C. \quad (5.3)$$

Подставив (5.1) в (5.3), выразим ε . Получим расчетную формулу для диэлектрической проницаемости титаната бария:

$$\varepsilon = \frac{Id}{U_0 2\pi f \varepsilon_0 S}. \quad (5.4)$$

Площадь пленок, нанесенных на поверхность образца, $S = 1,12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, его толщина $d = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, частота питающей сети $f = 50 \text{ Гц}$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

5.3 Программа работы

5.3.1 Установить переключателем Π одно из значений напряжения (20, 25 или 32 В) по указанию преподавателя.

5.3.2 Включить измерительный блок в сеть, записать силу тока в цепи сегнетоэлектрика и по формуле (5.4) найти диэлектрическую проницаемость ε_1 при комнатной температуре.

5.3.3 Включить электрическую печь в сеть и при нагреве через каждые 10°C снимать показания микроамперметра. Результаты измерений занести в таблицу 5.1. При достижении температуры 130°C прекратить измерения, выключить установку и открыть дверцу печи для охлаждения образца. *Во избежание ожогов прикасаться к нагретым внутри печи частям запрещается!*

Таблица 5.1 – Результаты измерений и вычислений

$t, ^\circ\text{C}$	$I, \text{мкА}$	ε	$\varepsilon/\varepsilon_1$

5.3.4 Для всех измеренных значений силы тока I по формуле (5.4) рассчитать значения ε . Результаты вычислений занести в таблицу 5.1.

5.3.5 По полученным результатам построить график зависимости $\varepsilon / \varepsilon_1 = f(t^\circ)$ и сделать вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое поляризация диэлектриков?
- 2 Какие вещества называются сегнетоэлектриками?
- 3 Охарактеризуйте основные свойства сегнетоэлектриков, отличающие их от обычных диэлектриков.
- 4 Почему свойства сегнетоэлектриков так существенно отличаются от свойств обычных диэлектриков?
- 5 Где и каким образом применяются сегнетоэлектрики?
- 6 Опишите принцип действия и устройство лабораторной установки.

6 Лабораторная работа № 6. Изучение обобщенного закона Ома в интегральной форме для постоянного тока

Цель работы: изучить закон Ома в интегральной форме и экспериментально определить ЭДС и внутреннее сопротивление гальванического элемента.

6.1 Общие сведения

Если в проводнике действует только *электростатическое поле*, то в нем может возникнуть только *кратковременный электрический ток*. Действительно, если обкладки конденсатора, заряженного до некоторой разности потенциалов $\Delta\phi$, соединить проводником, то по мере протекания тока конденсатор будет разряжаться, и с течением времени потенциал во всех точках системы уравнивается и ток прекратится.

Для поддержания электрического тока достаточно длительное время, необходим источник энергии, в котором за счет сил *не электростатического происхождения* осуществлялся бы перенос носителей тока в исходную точку с большим потенциалом. Указанные силы называются *сторонними*.

Сторонние силы могут быть химической, электромагнитной природы и др. Например, в большинстве аккумуляторов роль сторонних сил играют силы химического взаимодействия, приводящие к разделению молекул электролитов на разноименные заряды. В этом случае разность потенциалов на электродах аккумулятора поддерживается за счет энергии химической реакции. Основными характеристиками такого источника тока является его электродвижущая сила (ЭДС) и внутреннее сопротивление.

Электродвижущей силой называют физическую величину ε , численно равную работе сторонних (не потенциальных) сил по перемещению положительного единичного заряда на рассматриваемом участке цепи.

Однородным участком цепи называется такой участок, который не содержит источник ЭДС.

Неоднородный участок цепи содержит источник ЭДС.

На рисунке 6.1 показан неоднородный участок цепи, на котором электрический ток I поддерживается и разностью потенциалов ($\phi_1 - \phi_2$), и электродвижущей силой ε .

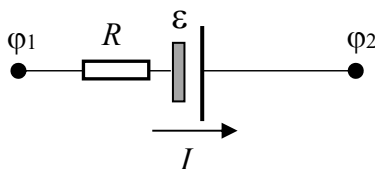


Рисунок 6.1 – Неоднородный участок электрической цепи

Математическое выражение *закона Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме* записывается в виде

$$IR_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon_{12}, \quad (6.1)$$

где R_{12} – электрическое сопротивление участка, которое содержит как внешнее R , относительно источника, так и внутреннее r сопротивления, $R_{12} = R + r$.

ЭДС так же, как и сила тока, является алгебраической величиной, поэтому следует учитывать ее знак.

Если ЭДС *способствует* перемещению положительных зарядов в данном направлении, то она считается *положительной*. Если ЭДС *препятствует* перемещению положительных зарядов в данном направлении, то она считается *отрицательной*.

Произведение сопротивления R_{12} участка цепи и силы тока I в нем называется напряжением. Из формулы (6.1) следует физический смысл напряжения: *напряжением на участке цепи называется физическая величина, численно равная алгебраической сумме работ электростатических и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль этого участка*.

Формула (6.1) называется также формулой *обобщенного закона Ома*, т. к. она справедлива для различных цепей.

Если на рисунке 6.1 концы участка замкнуть проводником, то получим *неразветвленную замкнутую цепь* (рисунок 6.2).

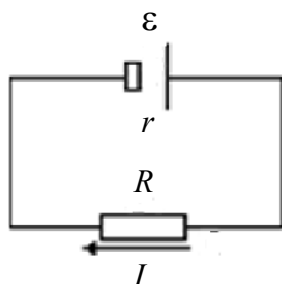


Рисунок 6.2 – Неразветвленная замкнутая цепь

В этом случае $\varphi_1 = \varphi_2$ и из формулы (6.1) получим закон Ома в следующем виде:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (6.2)$$

В случае неразветвленной замкнутой цепи ЭДС равна работе по перемещению единичного положительного заряда по всей цепи.

Из формулы (6.2) следует

$$\varepsilon = IR + Ir, \quad (6.3)$$

где IR – напряжение на внешнем участке цепи (на нагрузке);

Ir – напряжение на внутреннем участке цепи (между электродами).

При подключении к клеммам источника тока вольтметра его сопротивле-

ние является нагрузкой для источника тока. Поэтому вольтметр покажет не ЭДС источника, а напряжение U_B на внутреннем сопротивлении вольтметра:

$$IR_B = \varepsilon - Ir. \quad (6.4)$$

Из формулы (6.4) следует, что напряжение U_B , измеряемое вольтметром, может быть равно ЭДС только в том случае, если $r = 0$ или $I = 0$. Так как внутреннее сопротивление источника тока всегда отлично от нуля ($r \neq 0$), то в момент измерения ЭДС ток через элемент должен быть равен нулю. Однако в этом случае и вольтметр ничего не покажет. Поэтому ЭДС источников тока измеряют, как правило, методом компенсации, когда $I = 0$.

В случае *однородного* участка цепи (рисунок 6.3) с током I , $\varepsilon = 0$, $r = 0$ формула (6.1) принимает следующий вид:

$$I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R} \quad \text{или} \quad I = \frac{U}{R}. \quad (6.5)$$

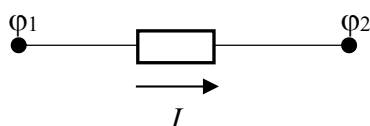


Рисунок 6.3 – Однородный участок цепи

6.2 Описание лабораторной установки и метода измерений

Электрическая схема установки показана на рисунке 6.4.

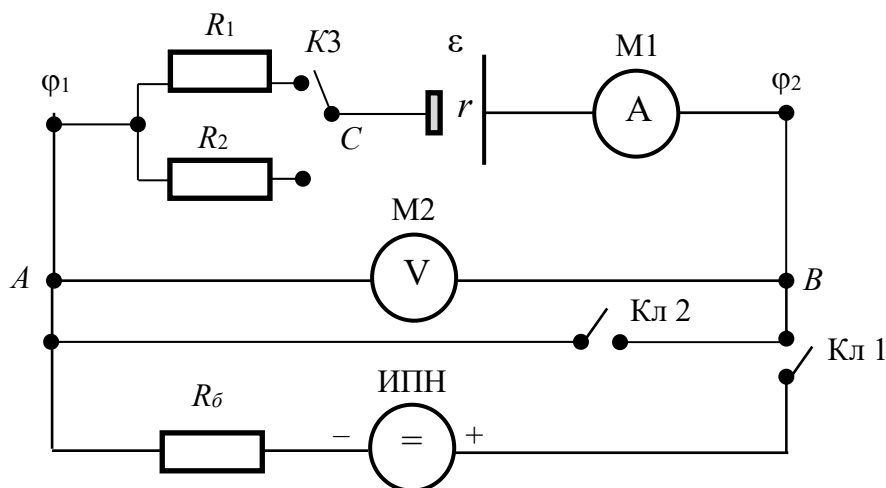


Рисунок 6.4 – Электрическая схема лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из неоднородного участка цепи, который содержит сопротивления нагрузки R_1 , R_2 и источник ЭДС с внутренним сопротивлением r . Сила тока на рассматриваемом участке измеряется мультимет-

ром М1. Разность потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$) создается внешним источником постоянного напряжения ИПН. Коммутация цепи осуществляется ключами Кл1, Кл2 и коммутатором КЗ.

Так как участок $A-B$ не содержит исследуемый источник, то $\varepsilon = 0$, $r = 0$ и формула (6.1) принимает следующий вид:

$$IR_B = U_B = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (6.6)$$

Из формулы (6.6) следует, что напряжение на вольтметре М2 равно разности потенциалов на изучаемом неоднородном участке цепи, т. е. вольтметр показывает разность потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$).

Преобразуем формулу (6.1) с учетом (6.6) к следующему виду:

$$I = \frac{U_B}{R_{12} + r} \pm \frac{\varepsilon_{12}}{R_{12} + r}. \quad (6.7)$$

В формуле (6.7) величины U_B и ε могут иметь как одинаковые, так и противоположные знаки. Измерения предпочтительно проводить при условии, когда $(\varphi_1 - \varphi_2)$ и ε имеют разные знаки и $|(\varphi_1 - \varphi_2)| > |\varepsilon|$. При постоянных значениях величин R_{12} , r и ε_{12} формула (6.7) дает прямо пропорциональную зависимость силы тока от разности потенциалов U_B на участке. Второй член правой части определяет положение графика относительно оси тока I .

На рисунке 6.5 показан пример графика, когда «плюс» внешнего источника ИПН подключен к «плюсу» источника ЭДС (зарядка аккумулятора).

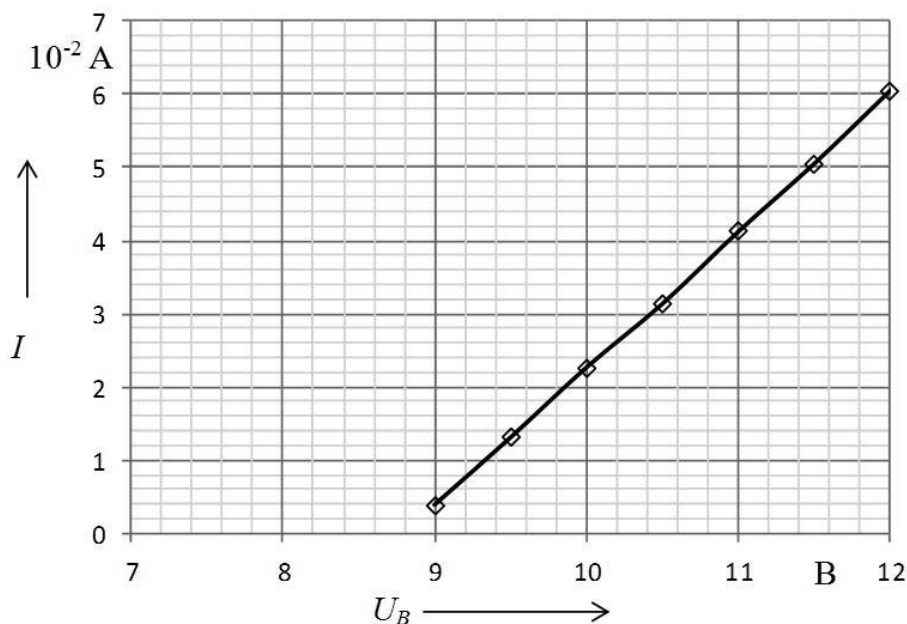


Рисунок 6.5 – График зависимости силы тока I от разности потенциалов U_B на участке

Тангенс угла наклона графика к оси U_B равен коэффициенту пропорциональности $1/(R_{12} + r_{12})$:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta I}{\Delta U_B} = \frac{1}{R_{12} + r}. \quad (6.8)$$

По вычисленному значению $\operatorname{tg} \alpha$ и известному значению R_{12} можно по формуле (6.8) определить внутреннее сопротивление исследуемого источника. Затем, выбрав любую пару значений I и U_B , по формуле (6.7) определить ЭДС. Также ЭДС можно определить графически, продлив полученный график до пересечения с осью U_B . Точка пересечения будет соответствовать значению ε .

Таким образом, экспериментальная часть работы по определению внутреннего сопротивления и ЭДС исследуемого источника сводится к измерению значения силы тока на неоднородном участке цепи при различных значениях разности потенциалов и построению вольт-амперной характеристики.

Если при замкнутом ключе Кл1 дополнительно замкнуть ключ Кл2, то разность потенциалов на исследуемом участке цепи будет равна нулю и получим замкнутую неразветвленную цепь, которая описывается формулой (6.2). Для изучения такой цепи вольтметр следует подключить между точками B – C , т. е. к сопротивлению нагрузки R_1 или R_2 . Поочередно включая R_1 и R_2 и измеряя соответствующие им значения U_1 , I_1 и U_2 , I_2 , можно определить ЭДС источника по формуле

$$\varepsilon = (R_2 - R_1) \frac{I_1 I_2}{I_1 - I_2}. \quad (6.9)$$

6.3 Программа работы

6.3.1 Изучение обобщенного закона Ома.

1 Электрическая цепь по схеме рисунка 6.4 дается собранной.

Убедиться, что исследуемый элемент и внешний источник соединены одноимёнными полюсами. Ключи Кл1, Кл2 и коммутатор $K3$ должны быть отключены. *До проверки схемы лаборантом или преподавателем установку не включать!*

2 На источнике ИПН регулировочную ручку поставить в крайнее левое положение. На амперметре М1 установить предел измерения 200 мА для постоянного тока, а на вольтметре М2 – предел измерения 20 В. Подключить вольтметр М2 к точкам A – B .

3 Подключить исследуемый источник в цепь. Включить источник ИПН. Коммутатором $K3$ подключить сопротивление R_1 и замкнуть ключ Кл1.

4 Вращая регулировочную рукоятку источника ИПН, по индикатору вольтметра М2 установить $U_B = 15$ В и дождаться установления постоянного значения тока на амперметре М1.

5 Уменьшая разность потенциалов от 15 до 10 В с шагом 1 В, для каждого значения U_B измерить силу тока по амперметру М1. Результаты измерения занести в таблицу 6.1.

6 Установить $U_B = 15$ В по индикатору вольтметра М2. Коммутатором $K3$

подключить сопротивление R_2 и дождаться установления постоянного значения силы тока на амперметре М1. Затем п. 5 повторить для сопротивления R_2 .

7 По данным таблицы 6.1 построить вольт-амперные характеристики исследуемого участка цепи в одной системе координат I и U_B .

8 По формуле (6.8) определить тангенсы углов наклона прямых и вычислить значения внутреннего сопротивления r_1 и r_2 . Вычислить среднее значение.

Значения сопротивлений R_1 и R_2 указаны на лабораторном стенде.

9 Выбрать из таблицы 6.1 любую пару значений I и U_B при R_1 и R_2 и по формуле (6.7) определить ε_1 и ε_2 . Вычислить среднее арифметическое значение $\langle \varepsilon \rangle$.

10 На графике, полученном в п. 7, продлить экспериментальные прямые до пересечения с осью U_B и по точке пересечения определить $\varepsilon_{гр}$.

Все полученные значения занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты измерений и вычислений

R , Ом	U_B , В	I , А	$\operatorname{tg} \alpha$	r_i , Ом	$\langle r \rangle$, Ом	ε_i , В	$\langle \varepsilon \rangle$, В	$\varepsilon_{гр}$, В	U_i , В	I_i , А	$\varepsilon_{замк}$, В
R_1											
R_2											

6.3.2 Закон Ома для неразветвленной замкнутой цепи.

1 При замкнутом ключе КЛ1 дополнительно замкнуть ключ КЛ2. По показанию вольтметра М2 убедиться, что $U_B = 0$, т. е. разность потенциалов на участке $A-B$ равна нулю.

2 Вольтметр М2 подключить к точкам $B-C$.

3 Коммутатором КЗ выбрать сопротивление R_1 и измерить напряжение U_1 и силу тока I_1 .

4 Повторить п. 3 для сопротивления R_2 , измерив значения U_2 и I_2 .

Значения U_1 , I_1 и U_2 , I_2 занести в таблицу 6.1.

5 По формуле (6.9) вычислить значение $\varepsilon_{замк}$ и сравнить его с $\langle \varepsilon \rangle$ и $\varepsilon_{гр}$.

6 Результат анализа значений $\varepsilon_{замк}$, $\langle \varepsilon \rangle$ и $\varepsilon_{гр}$ отразить в выводе.

Контрольные вопросы

- 1 Какова природа сторонних сил в источниках тока?
- 2 Можно ли измерить ЭДС с помощью вольтметра?
- 3 Записать и пояснить закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме.
- 4 Пояснить, как в работе определяются внутреннее сопротивление и ЭДС.
- 5 Можно ли измерить ЭДС, если изменить полярность его подключения?
- 6 Можно ли определить ЭДС, если $\varepsilon > (\varphi_1 - \varphi_2)$?

Список литературы

- 1 **Трофимова, Т. И.** Курс физики: учеб. пособие / Т. И. Трофимова. – М. : Высш. шк., 2017. – 560 с.
- 2 **Савельев, И. В.** Курс общей физики: учеб. пособие: в 3 т. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – 15-е изд., стер. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2019. – 500 с.
- 3 **Детлаф, А. А.** Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высш. шк., 2001. – 718 с.
- 4 **Майсова, Н. М.** Практикум по курсу общей физики / Н. М. Майсова. – М. : Высш. шк., 1970. – 328 с.