

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА”

Кафедра физики и химии

ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

*Одобрено учебно-методической комиссией строительного факультета
в качестве лабораторного практикума по курсу "Физика"*

Гомель 2017

УДК [53+531] (076.5)

ББК 22.3

Б90

Авторы: *М. В. Буй, Л. М. Липская, А. П. Павленко, Р. Г. Пинчук*

Рецензент – д-р техн. наук, профессор *О. В. Холодилов* (БелГУТ).

Буй, М. В.

Б90 Электростатика. Постоянный ток : лаб. практикум по курсу "Физика" / М. В. Буй [и др.] ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2017. – 70 с.
ISBN 978-985-554-576-8

Приведены описания лабораторных работ по разделам "Электростатика" и "Постоянный ток" программы курса физики для инженерно-технических специальностей высших учебных заведений.

Предназначен для методического обеспечения лабораторных занятий по физике студентов инженерно-технических специальностей.

УДК [53+531] (076.5)

ББК 22.3

ISBN 978-985-554-576-8

© Оформление. БелГУТ, 2017

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, предварительно ознакомившиеся с ее основным содержанием и порядком проведения по данному пособию, изучившие основные теоретические предпосылки к каждой работе по рекомендуемой учебной, научной и технической литературе, а также успешно сдавшие предварительный зачет на допуск к работе (контрольный опрос преподавателем устно, с помощью карточек и т. п.).

В связи с наличием значительного количества лабораторных работ по всем разделам курса физики на кафедре принята следующая их нумерация: по разделу «Механика» – 1.1, 1.2 и т.д.; «Молекулярная физика и термодинамика» – 2.1, 2.2 и т.д.; «Электростатика и постоянный ток» – 3.1, 3.2 и т.д.; «Магнетизм» – 4.1, 4.2 и т.д.; «Колебания и волны» – 5.1, 5.2 и т.д.; «Волновая оптика» – 6.1, 6.2 и т.д.; «Квантовая оптика, атомная физика, физика твердого тела» – 7.1, 7.2 и т.д. Эта нумерация использована в данном лабораторном практикуме.

Подключать приборы и аппаратуру к источникам питания и проводить опыт – только с разрешения преподавателя (лаборанта)!

Чтобы устранить возможность искажения показаний приборов, не допускается произвольное хождение студентов по лаборатории. В ней должны быть порядок и тишина.

Все черновые записи, результаты измерений, а также предварительные вычисления необходимо вести в специальной тетради, которую после завершения работы в конце занятия предъявить преподавателю на подпись. Отчеты по выполненным работам нужно оформ-

лять на бланках отчета по лабораторным работам чернилами четко, разборчиво, аккуратно.

Рисунки, схемы, графики (на миллиметровке) требуется выполнять с соблюдением всех правил технического черчения и государственных стандартов.

Зачеты по выполненным работам принимаются согласно расписанию занятий. К зачету студент обязан повторить основные теоретические сведения в объеме данной работы (используя основную и дополнительную литературу), содержание и порядок ее выполнения, а также подготовить ответы на контрольные вопросы.

При выполнении лабораторных работ вся подгруппа разбивается на бригады по 2–3 студента (согласно алфавитному списку), которые в течение всего семестра выполняют работы по специальному графику.

Студент должен соблюдать меры общей, электрической и противопожарной безопасности, которые следует предварительно изучить (в часы самоподготовки перед первым лабораторным занятием) и расписаться в журнале по технике безопасности.

Студент несет материальную ответственность за порчу лабораторного оборудования и приборов.

Лабораторная работа № 3.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ С ПОМОЩЬЮ АБСОЛЮТНОГО ВОЛЬТМЕТРА

Цель работы. Измерить силу, необходимую для отрыва противоположно заряженных пластин, разделенных диэлектриком, и определить электрическую постоянную.

1 Краткие сведения из теории

Абсолютным вольтметром называют прибор, с помощью которого можно определить разность потенциалов между двумя точками или телами (потенциалы тел считаются постоянными) посредством измерения каких-либо неэлектрических величин. Принципиально важным является то, что через вольтметр при этом не протекает элек-

трический ток. Тем самым он не вносит никаких дополнительных погрешностей в определяемую величину. Так как на рассматриваемых участках электрической цепи не действуют сторонние силы, то в дальнейшем будем использовать термин напряжение, которое в этих условиях равно разности потенциалов.

В данной работе используется абсолютный вольтметр (схема на рисунке 1), работа которого зависит от природы используемой пластины 4, а в расчетные формулы для определения напряжения входит ее диэлектрическая проницаемость и электрическая постоянная. Последняя может быть определена из этих же расчетных формул (при известном напряжении).

Таким образом, идея работы основана на использовании дополнительного вольтметра 6 для независимого определения напряжения и расчетных формул для определения электрической постоянной.

В работе используется конденсатор, между пластинами которого помещается пластина из диэлектрика. Для расчета его емкости используют формулу для плоского конденсатора.

В установке диэлектрическая пластина с известной диэлектрической проницаемостью помещается между обкладками измерительного конденсатора 3. Нижняя обкладка жестко закреплена, а верхняя сделана подвижной и подвешена на пружине 5. Конденсатор соединяется с высоковольтным источником (трансформатором 2), при этом напряжение ($\Delta\phi$) между обкладками измеряется с помощью вольтметра 6. Заряд конденсатора (q) связан с ним с помощью соотношения

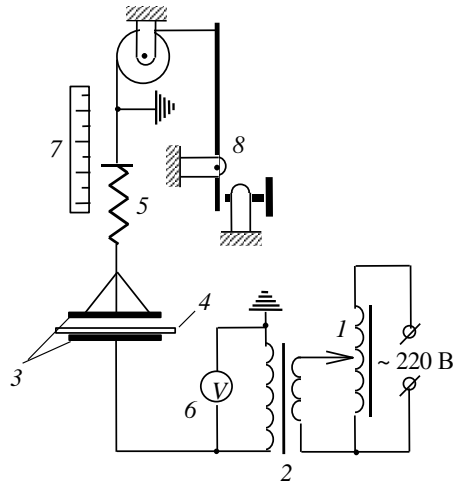


Рисунок 1

$$q = C\Delta\phi, \tag{1}$$

где C – емкость конденсатора.

Так как диаметр пластин много больше, чем расстояние между ними (d), то конденсатор приближенно можно считать плоским. Поэтому

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (2)$$

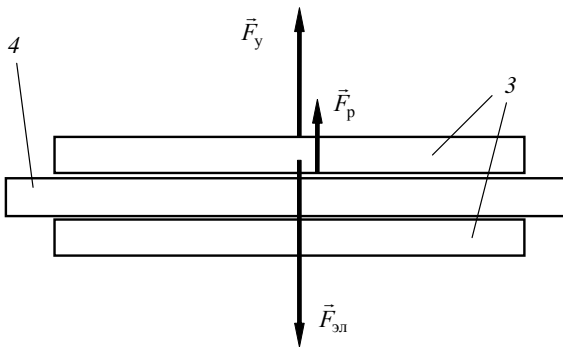


Рисунок 2

где ε – диэлектрическая проницаемость пластины; ε_0 – электрическая постоянная; S – площадь одной пластины конденсатора.

На верхнюю обкладку (рисунок 2) действуют три силы (силой тяжести вследствие ее малости здесь пренебрегают): $\vec{F}_{эл}$ –

сила со стороны электрического поля, создаваемого нижней обкладкой; \vec{F}_y – сила упругости со стороны пружины и \vec{F}_p – сила реакции со стороны пластины.

В силу того, что верхняя пластина вплоть до отрыва находится в равновесии, для сил справедливо соотношение

$$\vec{F}_{эл} + \vec{F}_y + \vec{F}_p = 0. \quad (3)$$

С учетом направлений этих сил (см. рисунок 2) соотношение (3) можно переписать для их модулей

$$F_{эл} = F_y + F_p. \quad (4)$$

Электрическое поле между обкладками приближенно можно считать однородным, поэтому модуль силы $F_{эл}$ в формуле (4) можно определить с помощью следующего соотношения (дальнейшие формулы записаны для модулей соответствующих векторов)

$$F_{эл} = qE_1, \quad (5)$$

где E_1 – напряженность электрического поля, создаваемого одной обкладкой, в тех точках, где находится другая обкладка (за диэлектриком). В силу того, что поля, создаваемыми обкладками, одинаковы, напряженность поля одной из них (внутри диэлектрика)

$$E = \frac{\Delta\varphi}{2d}.$$

В соответствии с граничным условием для напряженности нормального электрического поля на границе диэлектрик-воздух, в точках расположения второй обкладки напряженность поля будет больше в ε раз, т. е.

$$E_1 = \varepsilon E = \frac{\varepsilon\Delta\varphi}{2d}. \quad (6)$$

В результате подстановки (1), (2) и (6) в (5) получаем

$$F_{\text{эл}} = \frac{\varepsilon_0 S}{2} \left(\frac{\varepsilon\Delta\varphi}{d} \right)^2. \quad (7)$$

Модуль силы F_y можно определить с помощью закона Гука (считая пружину S абсолютно упругой)

$$F_y = k\Delta l, \quad (8)$$

где k – коэффициент жесткости пружины; Δl – увеличение ее длины.

По мере увеличения удлинения пружины (с помощью винта и нити, соединенной с ее верхним концом) величина F_y увеличивается по величине, а так как соотношение (4) остается справедливым, то сила реакции уменьшается по величине. Отрыв верхней обкладки от диэлектрической пластины наступает в тот момент, когда сила реакции становится равной нулю, т. е. в этот момент выполняется соотношение

$$F_{\text{эл}} = F_y. \quad (9)$$

Подставляя (7) и (8) в (9), получим окончательную расчетную формулу

$$\varepsilon_0 = \frac{2k\Delta l}{S} \left(\frac{d}{\varepsilon \Delta \varphi} \right)^2. \quad (10)$$

Следует отметить, что с целью упрощения конструкции установки, в ней используется переменный электрический ток промышленной частоты. Однако известно, что в этом случае все соотношения между действующими значениями электрических величин остаются такими же, как и между постоянными. Справедливым остается также и выражение для электрической силы (7). Поэтому при условии, что дополнительный вольтметр показывает именно действующее значение разности потенциалов (как это реализовано в настоящей установке), конечная формула для расчета электрической постоянной (10) также остается справедливой.

2 Оборудование и приборы

1 Установка для определения электрической постоянной (см. рисунок 1), в состав которой входят: автотрансформатор 1, высоковольтный трансформатор 2, измерительный конденсатор 3, диэлектрическая пластина 4, пружина 5, высоковольтный вольтметр 6, линейка 7, механизм для изменения удлинения пружины 8. В целях безопасности вся установка находится в шкафу с блокировкой источника питания высокого напряжения.

2 Штангенциркуль.

3 Порядок выполнения работы

Будьте осторожны! Высокое напряжение!

Все измерения проводить, когда шкаф закрыт. Диэлектрическая пластина заменяется только тогда, когда установка обесточена.

1 При необходимости с помощью штангенциркуля измерить толщину диэлектрической пластины 4 не менее чем в трех местах. Рассчитать среднее значение и записать его в таблицу 1. Ручку выключенного автотрансформатора повернуть против часовой стрелки до упора. Под наблюдением преподавателя (лаборанта) положить на нижнюю обкладку измерительного конденсатора 3 пластину 4.

2 Вращением маховика механизма 8 против часовой стрелки медленно опустить верхнюю обкладку конденсатора 3 на пластину 4. Как только обкладка коснется пластины, вращение маховика прекратить.

Записать в таблицу положение на линейке 7 указателя, связанного с верхним концом пружины 5 (l_0).

3 Получить задание преподавателя, сколько различных диэлектрических пластин 4 использовать в работе, а также при каких значениях напряжения производить эксперименты. Включить автотрансформатор 1 в сеть 220 В.

4 Вращением ручки автотрансформатора 1 по часовой стрелке установить напряжение, отсчитываемое по вольтметру 6, равным одному из заданных значений. Медленно вращать маховик механизма 8 по часовой стрелке до тех пор, пока верхняя обкладка не оторвется от пластины 4. Записать положение указателя на линейке 7, соответствующее моменту отрыва (l_1). Затем опустить верхнюю обкладку до прежней отметки l_0 .

5 Повторить измерения положения l_1 еще два раза, по трем значениям рассчитать среднее и занести его в таблицу.

6 Повторить п. 4, 5 для всех заданных преподавателем значений напряжения.

7 Выключить установку. При необходимости смены диэлектрической пластины начать работу с п. 1. В результате в таблице число строк будет равно числу вариантов (различные напряжения и/или диэлектрические проницаемости), заданных преподавателем.

Таблица 1

$d, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	$k, \text{ Н/м}$	ε	$\Delta\varphi, \text{ В}$	l_0	l_1	Δl	$\varepsilon_0, \text{ Ф/м}$
					М			

8 Для каждого измерения вычислить удлинение пружины по формуле

$$\Delta l = l_1 - l_0$$

и занести полученное значение в таблицу. Для каждого измерения по формуле (10) вычислить значение электрической постоянной и занести его в таблицу.

9 Определить среднее значение электрической постоянной $\langle \varepsilon_0 \rangle$, погрешности отдельных измерений $\Delta \varepsilon_0$, а также среднеквадратич-

ную погрешность σ и полуширину доверительного интервала Δ для доверительной вероятности $P = 0,95$ по формулам, которые приведены на плакате в лаборатории.

Результат представить в виде

$$\varepsilon_0 = \langle \varepsilon_0 \rangle \pm \Delta \quad \text{при } P = 0,95.$$

Сравнить полученные значения с теоретической величиной электрической постоянной и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1 Что такое поляризация диэлектриков, какие бывают ее виды? Как происходит поляризация диэлектриков?

2 Что такое конденсатор, какие бывают его виды? Что такое емкость конденсатора и в каких единицах она измеряется?

3 Что такое потенциал электрического поля, как измеряется разность потенциалов? Как потенциал связан с напряженностью в общем случае и в случае однородного поля?

4 Что такое абсолютный вольтметр? Какая неэлектрическая величина, измеряемая в приведенной установке, может быть использована для определения напряжения? Почему эта установка не потребляет электрический ток?

5 Получите формулу для напряженности электрического поля, создаваемого одной обкладкой плоского конденсатора (6) (используйте граничное условие для напряженности нормального электрического поля на границе диэлектрик-воздух).

6 Получите формулу для напряженности электрического поля, создаваемого одной обкладкой плоского конденсатора (6) (используйте свойства электрического поля, вытекающие из симметрии распределения заряда на обкладке, а также теорему Гаусса для электрического поля в вакууме).

7 Выведите формулу для силы взаимодействия обкладок плоского конденсатора (7) для случая твердого диэлектрика.

8 Обоснуйте метод определения электрической постоянной с помощью абсолютного вольтметра. Выведите формулу (10).

9 Обоснуйте, почему все рассуждения и выкладки, приведенные для постоянного напряжения на конденсаторе, остаются справедливыми и для источника переменного напряжения (как в рассматриваемой работе).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВЕЩЕСТВА

Цель работы. Отградуировать электроскоп и определить диэлектрическую проницаемость образца.

1 Краткие сведения из теории

Диэлектрическая проницаемость вещества (ϵ) показывает, во сколько раз изотропная безграничная среда ослабляет напряженность электрического поля по сравнению с вакуумом (при неизменном расположении зарядов, создающих поле). Кроме того, ее величина определяет, во сколько раз нормальная составляющая напряженности электрического поля на границе диэлектрик-вакуум в веществе меньше, чем такая же составляющая в вакууме. Для большинства диэлектриков ее величина равна нескольким единицам. Диэлектрическая проницаемость может зависеть от частоты колебаний электрического поля (при ее значениях, сравнимых с собственными частотами колебаний электронов и/или атомов). Кроме того, для полярных диэлектриков она также зависит от температуры. Диэлектрическую проницаемость можно определить, измеряя силу притяжения пластин конденсатора, разделенных исследуемым веществом.

Для этого используют установку, схема которой приведена на рисунке 1. Диэлектрическая пластина 4 помещается в измерительный конденсатор.

К пластинам конденсатора подводится высокое напряжение. Так как пластинам сообщаются разноименные заряды, они притягиваются с некоторой силой, которую можно определить по

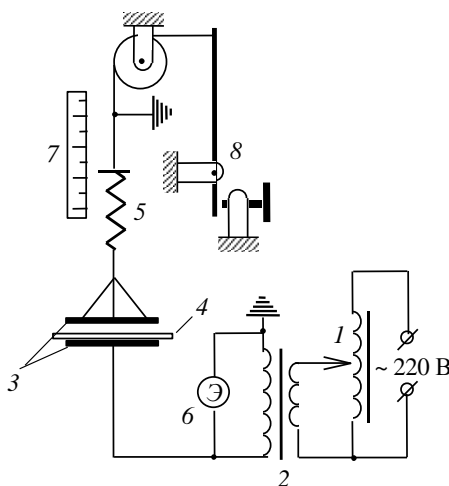


Рисунок 1

растяжению пружины 5. Сила взаимодействия пластин зависит от разности потенциалов между ними (далее – напряжение) и диэлектрической проницаемости изолятора, находящегося между пластинами конденсатора, что и дает возможность рассчитать величину ϵ .

В данной лабораторной работе напряжение определяется электроскопом 6. Предварительно электроскоп градуируют, т. е. находят зависимость показаний прибора от приложенного напряжения.

Выведем формулу для силы взаимодействия (притяжения) обкладок конденсатора ($\vec{F}_{\text{эл}}$), применив энергетический метод. Приложим к одной из обкладок (правой на рисунке 2) внешнюю силу (\vec{F}), направленную противоположно электрической силе и равную ей по модулю. Пусть в этих условиях правая пластина совершит перемещение на расстояние dx (квазистатическое, т. к. векторная сумма сил равна нулю). Работа внешней силы будет равна

$$dA = F dx \Rightarrow dA = F_{\text{эл}} dx. \quad (1)$$

Так как сила взаимодействия не зависит от воображаемого движения, а является функцией состояния системы, то для ее определения можно принять, что при отодвигании правой обкладки заряд конденсатора не менялся. При этом по закону изменения энергии работа внешней силы равна изменению энергии конденсатора (в силу квазистатичности движения кинетическая энергия равна нулю):

$$dA = dW. \quad (2)$$

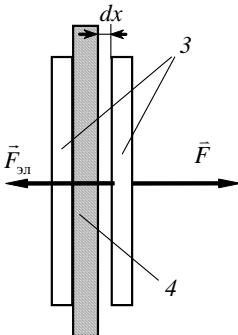


Рисунок 2

При постоянном заряде электрическое поле внутри диэлектрика не поменяется. Увеличение энергии конденсатора произойдет за счет появления электрического поля в зазоре толщиной dx (объем зазора $dV = Sdx$). Поэтому

$$dW = w dV = w S dx, \quad (3)$$

где объемная плотность энергии электрического поля

$$w = \frac{\epsilon_0 E_{\text{в}}^2}{2}. \quad (4)$$

Здесь $E_{\text{в}}$ – напряженность электрического поля в зазоре, т. е. в

воздухе около границы с диэлектриком. Появление воздушного зазора является принципиальным следствием того, что диэлектрик твердый. Для жидкого или газообразного диэлектрика он бы заполнил объем зазора. В данном явлении напряженности полей перпендикулярны границе, поэтому из граничного условия следует, что

$$E_{\text{в}} = \varepsilon E = \varepsilon \frac{\Delta\varphi}{d}, \quad (5)$$

где E – напряженность электрического поля в диэлектрике; $\Delta\varphi$ – напряжение между обкладками; d – расстояние между ними.

Подставим (5), (4) и (3) в (2), а также (1) в (2). В результате получим выражение для электрической силы

$$F = \frac{\varepsilon_0 S}{2} \left(\frac{\varepsilon \Delta\varphi}{d} \right)^2. \quad (6)$$

Считаем пружину абсолютно упругой. Тогда по закону Гука сила, растягивающая пружину на величину Δl ,

$$F_y = k\Delta l, \quad (7)$$

где k – жесткость пружины.

В момент отрыва верхней обкладки от диэлектрической пластины силы F и F_y оказываются равными по модулю. Принимая во внимание выражение (7), получим из формулы (6)

$$\Delta\varphi = \frac{d}{\varepsilon} \sqrt{\frac{2k\Delta l}{\varepsilon_0 S}}. \quad (8)$$

По измеренным значениям удлинения пружины по формуле находим величину напряжения между обкладками конденсатора, заполненного изолятором с известной диэлектрической проницаемостью. Таким образом определяем зависимость между показаниями электроскопа и его потенциалом (т. к. другая обкладка и второй электрод электроскопа заземлены).

Заменим диэлектрик в конденсаторе с известной ε другим диэлектриком с неизвестной ε_1 . Значение ε_1 можно определить с помощью формулы, полученной из выражения (8), т. е.

$$\varepsilon_1 = \frac{d_1}{\Delta\varphi_1} \sqrt{\frac{2k\Delta l_1}{\varepsilon_0 S}}. \quad (9)$$

где Δl_1 – растяжение пружины, вызванное взаимодействием пластин конденсатора с исследуемым диэлектриком; d_1 – толщина пластины этого диэлектрика; $\Delta\varphi_1$ – напряжение между обкладками в опыте с исследуемым диэлектриком (потенциал электроскопа).

Следует отметить, что с целью упрощения конструкции установки, в ней используется переменный электрический ток промышленной частоты. Однако известно, что в этом случае все соотношения между действующими значениями электрических величин остаются такими же как и между постоянными. Справедливым остается также и выражение для электрической силы (7). Поэтому при условии, что дополнительный вольтметр показывает именно действующее значение разности потенциалов (как это реализовано в настоящей установке), конечная формула для расчета электрической постоянной (9) также остается справедливой.

2 Оборудование и приборы

Установка для определения диэлектрической проницаемости (см. рисунок 1). В целях безопасности она находится в шкафу с блокировкой питания источника высокого напряжения. На измерительный конденсатор подается высокое напряжение от высоковольтного трансформатора. Трансформатор питается от автотрансформатора. Величина растяжения пружины определяется по указателю. Верхняя пластина поднимается маховиком. К нижней пластине для определения потенциала подключен электроскоп, корпус которого заземлен. Стрелке и стержню электроскопа сообщается одноименный заряд, в результате чего они отталкиваются. Чем выше потенциал, тем больше угол отклонения стрелки.

3 Порядок выполнения работы

1 Ручку выключенного автотрансформатора повернуть против часовой стрелки до упора. Под наблюдением преподавателя (лаборанта) положить на нижнюю пластину измерительного конденсатора образец с известной диэлектрической проницаемостью. Будьте осторожны! Высокое напряжение! Все измерения проводить, когда шкаф за-

крыт. Диэлектрик заменяется только тогда, когда установка обесточена.

2 Вращением маховика против часовой стрелки медленно опустить верхнюю пластину на диэлектрик. Как только пластина коснется диэлектрика, вращение маховика прекратить. Записать в таблицу 1 положение указателя (l_1) (цена малого деления шкалы 2 мм).

3 Включить автотрансформатор в сеть 220 В и медленно повернуть его ручку по часовой стрелке настолько, чтобы стрелка электроscopes отклонилась на одно деление.

4 Медленно вращать маховик по часовой стрелке до тех пор, пока верхняя пластина конденсатора не оторвется от диэлектрика. Записать положение указателя в этот момент (l_2) в таблицу 1.

Таблица 1

№ измерения	d , м	S , м ²	k , Н/м	l_1 , м	N , дел.	l_2 , м	Δl , м	$\Delta\varphi$, В

5 Опустить верхнюю обкладку на диэлектрическую пластину.

6 Увеличить напряжение на конденсаторе, чтобы показания электроскопа соответствовали последовательно 2, 3, 4-м делениям. Произвести измерения согласно пп. 4, 5. Все значения l_2 записать в таблицу 1.

7 Вычислить изменение длины пружины $\Delta l = l_2 - l_1$. По формуле (8) вычислить значения разности потенциалов $\Delta\varphi$ и занести их в таблицу 2.

8 Построить градуировочный график электроскопа, для чего вдоль оси абсцисс отложить число делений из таблицы 1, а вдоль оси ординат – соответствующее значение напряжения.

9 Повернуть ручку автотрансформатора против часовой стрелки до упора. Выключить автотрансформатор. Под наблюдением преподавателя (лаборанта) поместить в измерительный конденсатор образец с неизвестной диэлектрической проницаемостью.

10 Произвести измерения согласно пп. 2–6. Результаты занести в таблицу 2. Уменьшить напряжение до нуля и выключить автотрансформатор.

Таблица 2

№ измерения	d_1 , м	l_1 , м	N , дел.	l_2 , м	Δl_1 , м	$\Delta\varphi_1$, В	ε_1	$\langle\varepsilon_1\rangle$	$\Delta\varepsilon_1$

11 Вычислить изменение длины пружины $\Delta l_1 = l_2 - l_1$. Определить, пользуясь градуировочным графиком, напряжение между пластинами конденсатора по значениям N .

12 С помощью формулы (9) вычислить диэлектрическую проницаемость (значения Δl_1 , $\Delta\varphi$ взять из таблицы 2, величина d_1 указана на установке).

13 Определить среднее значение диэлектрической проницаемости и доверительный интервал при $P = 0,95$. Результат представить в виде

$$\varepsilon_1 = \langle\varepsilon_1\rangle \pm \Delta\varepsilon_1.$$

Контрольные вопросы

1 Что такое поляризация диэлектриков, какие бывают ее виды? Как происходит поляризация диэлектриков?

2 Что такое конденсатор, какие бывают его виды? Что такое емкость конденсатора и в каких единицах она измеряется?

3 Что такое потенциал электрического поля, как измеряется разность потенциалов? Как потенциал связан с напряженностью в общем случае и в случае однородного поля?

4 Что такое диэлектрическая проницаемость вещества?

5 Выведите формулу для силы взаимодействия обкладок плоского конденсатора (6) для случая твердого диэлектрика.

6 Обоснуйте метод градуировки электроскопа. Выведите формулу (8).

7 Обоснуйте, почему все рассуждения и выкладки, приведенные для постоянного напряжения на конденсаторе, остаются справедливыми и для источника переменного напряжения (как в рассматриваемой работе).

8 В чем заключается метод измерения диэлектрической проницаемости, применяемый в данной работе? Какие и как для этого измеряются физические величины?

ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА

Цель работы. Определить баллистическую постоянную гальванометра и измерить емкость конденсатора с помощью баллистического гальванометра.

1 Краткие сведения из теории

Конденсатор – устройство, способное накапливать и отдавать (перераспределять) электрические заряды. Он состоит из двух (иногда более) проводящих тел (обкладок), разделенных диэлектриком. Практически во всех случаях, имеющих место на практике, заряды двух обкладок заряженного конденсатора равны по модулю и противоположны по знаку. Поэтому используется термин: заряд конденсатора q – модуль заряда одной из его обкладок. Емкостью C конденсатора называется отношение его заряда к разности потенциалов между обкладками U :

$$C = \frac{q}{U}. \quad (1)$$

Во всех случаях, когда на рассматриваемых участках электрической цепи не действуют сторонние силы, разность потенциалов между двумя точками равна напряжению между ними. Поэтому на практике чаще используют последний термин.

Как правило, емкость не зависит от заряда и напряжения и определяется размером, формой обкладок, расстоянием между ними и диэлектрической проницаемостью изолятора, разделяющего обкладки. Единицей емкости в СИ является фарад ($1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$).

На практике используют соединение нескольких конденсаторов в различные батареи; простейшими из соединений являются параллельное и последовательное. Для параллельного соединения двух конденсаторов (рисунок 1) формулы замещения (замена батареи одним эквивалентным конденсатором) имеют вид:

$$q = q_1 + q_2, \quad U_1 = U_2, \quad (2)$$

где q – модуль заряда одной из обкладок эквивалентного конденсатора; U – напряжение между его обкладками; q_1 и q_2 – модули зарядов каждого из конденсаторов; U_1 и U_2 – напряжения между их соответствующими обкладками.

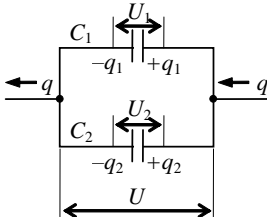


Рисунок 1

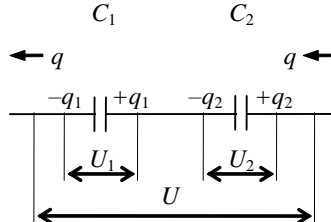


Рисунок 2

Из формул (2) с помощью определяющего соотношения (1) можно получить выражение для электроемкости эквивалентного конденсатора C :

$$C = C_1 + C_2. \quad (3)$$

Для последовательного соединения двух конденсаторов (рисунок 2) соответствующие формулы замещения и вывод для электроемкости эквивалентного конденсатора имеют вид:

$$q_1 = q_2, \quad U = U_1 + U_2, \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}. \quad (4)$$

Обобщение формул (2), (3) и (4) на случай трех и более конденсаторов очевидно.

Емкость конденсатора можно рассчитать по формуле (1), измерив заряд и напряжение между его обкладками. Напряжение измеряется вольтметром, а заряд – баллистическим гальванометром. Основными элементами баллистического гальванометра (рисунок 3, а, б) являются подвижная рамка и постоянный магнит. Рамка состоит из плотно уложенных и склеенных лаком витков изолированной проволоки. Упругая нить E с укрепленным на ней легким зеркалом Z служит подвесом для рамки C . Рамка может свободно вращаться в зазоре, образованном двумя полюсами постоянного магнита и цилиндром M (такая конструкция обеспечивает в зазоре практически радиальное магнитное поле).

Ток к рамке подводится по упругой нити E и тонкой металлической ленте L , которая не мешает свободному вращению рамки. Под гальванометром помещается лампа с длиннофокусной линзой. Луч от лампы проходит через линзу, отражается от зеркала и попадает на шкалу прибора.

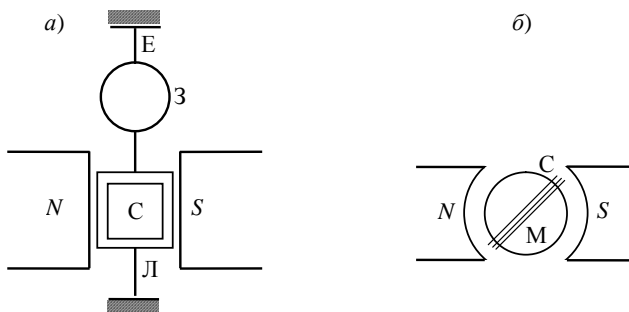


Рисунок 3

Движение рамки подчиняется основному закону вращательного движения, которому соответствует уравнение моментов

$$\frac{dL}{dt} = M,$$

где L – момент импульса рамки; M – момент действующих на нее внешних сил.

В обычных гальванометрах период собственных колебаний рамки пренебрежимо мал по сравнению с характерными временами изменения электрического тока в цепи, поэтому угол отклонения рамки в каждый момент времени пропорционален силе протекающего тока. В данной конструкции внесены изменения. Момент инерции подвижной части (J) резко увеличен с помощью присоединения к нижней части рамки подвеса с грузиком, в результате чего значительно повышается период собственных колебаний рамки. В результате он оказывается гораздо больше, чем длительность импульса тока, и за время этого импульса рамка практически не успевает повернуться. Поэтому силы упругости в нити практически отсутствуют и момент

внешних сил определяется только силами Ампера, действующими на элементы рамки со стороны магнитного поля. Силы Ампера при прочих равных условиях пропорциональны силе протекающего тока (I), поэтому

$$M \sim I.$$

С учетом этого из уравнения моментов следует, что

$$L \sim \int_0^{\Delta t} Idt \sim q. \quad (5)$$

Здесь L – значение момента импульса рамки сразу после прохождения импульса тока разряда; Δt – длительность этого импульса; q – электрический заряд, прошедший через рамку. Последнее следует из определения силы тока.

Кинетическая энергия, которую приобретает рамка сразу после прохождения импульса тока, связана с моментом импульса соотношением

$$W_k = \frac{L^2}{2J}. \quad (6)$$

При дальнейшем движении на рамку действуют только силы упругости. Для начального положения (сразу после прохождения импульса тока) связанная с ними потенциальная энергия практически равна нулю (так как отклонением рамки от положения равновесия к этому моменту можно пренебречь). Для положения максимального отклонения рамки кинетическая энергия равна нулю, а для потенциальной энергии справедливо соотношение

$$W_p = \frac{f\varphi^2}{2}, \quad (7)$$

где f – модуль упругости нити; φ – максимальный угол отклонения рамки.

С учетом изложенных соображений из закона сохранения механической энергии следует, что

$$0 + W_k = W_p + 0.$$

Отсюда, а также из (6) и (7) получим, что

$$L \sim \varphi.$$

Из соотношения (5) и последней формулы следует, что

$$q \sim \varphi.$$

При таких условиях наибольший угол отклонения рамки гальванометра, а значит, и светового указателя на шкале, пропорционален начальной кинетической энергии, т. е. величине заряда, прошедшего через баллистический гальванометр.

Измерения проводятся на установке, схема которой приведена на рисунке 4. К правым клеммам источника регулируемого напряжения (ИРН) подключен вольтметр, а к левым – переключатель П. В одном положении переключателя конденсатору C сообщается заряд.

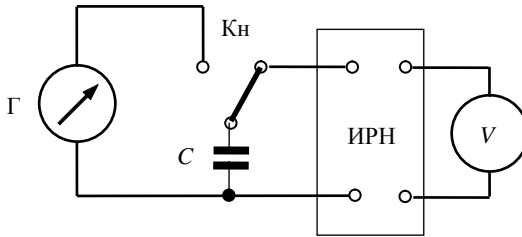


Рисунок 4

При переводе переключателя П в другое положение конденсатор разряжается на гальванометр, и через него протечет накопленный в конденсаторе C заряд. Так как наибольшее смещение указателя на шкале (зайчика) α пропорционально протекшему заряду, то

$$q = B\alpha, \quad (8)$$

коэффициент пропорциональности B называется баллистической постоянной гальванометра.

Из формул (1) и (8) следует, что

$$C = \frac{B\alpha}{U}. \quad (9)$$

Для того чтобы определить емкость, необходимо предварительно найти баллистическую постоянную гальванометра. Для этого используется образцовый конденсатор с известной емкостью C_0 . Из формулы (9) для этого случая следует

$$B = \frac{C_0 U}{\alpha}. \quad (10)$$

Измерив напряжение и максимальное отклонение зайчика по формуле (10), можно определить баллистическую постоянную.

2 Оборудование и приборы

Установка (см. рисунок 4), включающая ИРН – источник регулируемого напряжения, П – переключатель, С – конденсатор, Г – гальванометр.

3 Порядок выполнения работы

1 Собрать электрическую цепь (см. рисунок 4), подключив образцовый конденсатор.

2 Регулятор ИРН повернуть против часовой стрелки до упора. Переключить схему на зарядку конденсатора.

3 Включить баллистический гальванометр в сеть. Световой указатель должен находиться на нуле шкалы. В случае нарушения работы прибора необходимо доложить лаборанту.

4 Получить указание преподавателя о количестве измерений и конкретных значениях напряжения. Установить напряжение с помощью ИРН, контролируя его по вольтметру. Переключить схему на разрядку конденсатора. Зафиксировать максимальное смещение светового указателя на шкале. Для контроля стабильности проделать это 2–3 раза. В случае получения близких по величине значений, зафиксировать среднее из них. По формуле (10) рассчитать значения баллистической постоянной. Занести результаты (значения α и B) в таблицу 1 (здесь указан пример для пяти значений напряжения).

Таблица 1

U , мВ					
α , дел.					
B , Кл/дел.					

5 Повторить измерения п. 4 для всех заданных значений напряжения (для быстрого успокоения рамки гальванометра можно переключить режим измерений с "×1" на "×100" и обратно). Вычислить среднее значение баллистической постоянной для всех значений напряжения U .

6 Выключить ИРН. Заменить в цепи образцовый конденсатор C_0 на конденсатор неизвестной емкости C' . Включить ИРН.

7 Провести измерения согласно пп. 4, 5. По формуле (9), используя среднее значение постоянной, вычислить значения емкости неизвестного конденсатора. Результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

U , мВ					
α , дел.					
C , Ф					
ΔC , Ф					

8 Найти среднее значение емкости $\langle C \rangle$, абсолютные погрешности ΔC , среднюю квадратичную ошибку S и полуширину доверительного интервала Δ для заданного преподавателем значения доверительной вероятности P .

9 Результаты измерений представить в виде

$$C = (\langle C \rangle \pm \Delta) \text{ мкФ}, \varepsilon = \dots \%, \text{ при } P = \dots$$

Контрольные вопросы

1 Что такое емкость конденсатора, от каких параметров и как она зависит, что служит ее единицей в СИ и как она связана с другими единицами?

2 Какие бывают простейшие виды соединения конденсаторов в батарее? Вывести формулы (3) и (4).

3 Как устроен баллистический гальванометр? В чем состоит принцип его действия?

4 Обосновать соотношение (8) и указать при каких допущениях оно справедливо.

5 Что называется баллистической постоянной гальванометра. Найти единицу ее измерения.

6 В чем заключается метод определения емкости конденсатора при помощи баллистического гальванометра?

Лабораторная работа № 3.4

ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ МОСТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы. Изучить особенности работы емкостного и омического делителей напряжения, а также составленного из них моста переменного тока, измерить емкость конденсаторов при их параллельном и последовательном соединениях.

1 Краткие сведения из теории

Основной характеристикой конденсатора является его емкость, под которой понимают величину, равную отношению заряда на одной его обкладке q к разности потенциалов (напряжению) между обкладками U :

$$C = \frac{q}{U}. \quad (1)$$

За единицу емкости принимают емкость такого конденсатора, напряжение между обкладками которого изменяется на 1 В при переносе с одной обкладки на другую заряда в 1 Кл. Эта единица емкости называется Фарад (Ф). Согласно (1)

$$1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл}/1 \text{ В}.$$

Один фарад — очень большая величина, поэтому на практике чаще всего пользуются единицами, равными долям фарада: миллифа-

рад (1 мФ = 10^{-3} Ф), микрофарад (1 мкФ = 10^{-6} Ф), нанофарад (1 нФ = 10^{-9} Ф) и пикофарад (1 пФ = 10^{-12} Ф).

Емкость не зависит от заряда и напряжения, она определяется размерами, формой обкладок, расстоянием между ними и диэлектрической проницаемостью изолятора, заполняющего пространство между обкладками.

Одним из способов измерения емкости конденсатора является сравнение ее с емкостью известного конденсатора. Чаще всего это реализуется с помощью включения конденсаторов в мостовую схему, к которой приложено переменное напряжение (мост переменного тока). Простейшая схема такого типа изображена на рисунке 1.

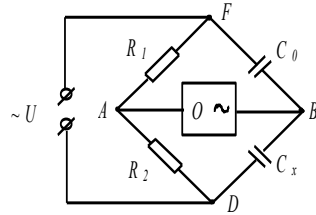


Рисунок 1

Мост состоит из двух делителей напряжения U : омического – R_1 и R_2 , емкостного – C_0 и C_x . Расчет этих делителей проще всего провести в часто встречающемся на практике случае, когда токи в схеме являются **квазистационарными**, т. е. в каждый момент времени мгновенные значения силы тока во всех точках цепи будут практически одинаковыми.

Для периодически изменяющихся токов условие квазистационарности имеет вид

$$\tau \ll T,$$

где $\tau = \frac{l}{c}$ – характерное время передачи изменений в самую отдаленную точку электрической цепи длиной l ; T – период изменений силы тока; c – скорость распространения по цепи электромагнитных возмущений (скорость света). Для цепи длиной $l = 1$ м характерное время $\tau \sim 10^{-8}$ с. Таким образом, вплоть до периодов порядка 10^{-6} с, что соответствует частоте 1 МГц, токи в такой цепи можно с большой точностью считать квазистационарными.

Мгновенные значения квазистационарных токов и напряжений подчиняются закону Ома и для них справедливы правила Кирхгофа.

Обозначим мгновенное напряжение в т. D через U (в дальнейшем предполагается, что все напряжения измеряются, если это не оговорено особо, относительно т. F). При условии, что мост находится в

равновесии, т. е. сила тока на участке AB равна нулю (что контролируется переменным нуль-индикатором), мгновенное значение напряжения в т. A (U_A) определяется из условия

$$\frac{U_A}{R_1} = \frac{U - U_A}{R_2},$$

которое вытекает из законов Ома для участков цепи FAD (омического делителя) и равенства силы тока в резисторах R_1 и R_2 . Отсюда

$$U_A = U \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (2)$$

Для определения мгновенного напряжения в т. B (U_B) воспользуемся тем, что заряды на обкладках конденсаторов C_0 и C_x (измеряемая емкость) равны (мгновенные значения). Если выразить их через соответствующие напряжения с помощью (1), то получим соотношение

$$C_0 U_B = C_x (U - U_B),$$

отсюда

$$U_B = U \frac{C_x}{C_x + C_0}. \quad (3)$$

При равновесии моста $U_A = U_B$, откуда после несложных преобразований из (2) и (3) получаем

$$C_x R_2 = C_0 R_1. \quad (4)$$

Для измерения емкости неизвестного конденсатора (C_x) сопротивления R_1 и R_2 делают переменными и с помощью нуль-индикатора подбирают такие их значения, чтобы мост находился в равновесии. На практике из-за паразитных связей между различными участками моста, потерь в конденсаторах, а также наличия индуктивных и емкостных составляющих у сопротивлений R_1 и R_2 напряжения U_A и U_B могут иметь несколько отличающиеся фазы, вследствие чего даже при равенстве их амплитуд мгновенное значение силы тока в диагонали AB не будет равно нулю. В этом случае добиваются его минимально возможного значения. Затем емкость неизвестного конденсатора определяется из соотношения

$$C_x = C_0 \frac{R_1}{R_2}. \quad (5)$$

2 Оборудование и приборы

Установка (рисунок 2) состоит из источника синусоидального напряжения 1 , на переднюю панель которого вынесен переключатель ступенчатого сопротивления R_2 2 (рисунок 3, *a*), а к верхней панели подключается съемный блок неизвестных емкостей 3 с переключателями $SA1$ и $SA2$ (рисунок 3, *б*); используемого в качестве переменного нуля-индикатора электронного осциллографа 4 и магазина сопротивлений 5 , который служит в качестве переменного сопротивления R_1 со ступенчатой регулировкой.

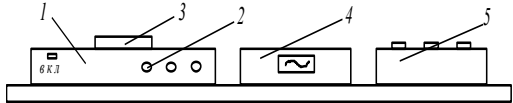


Рисунок 2

Значение емкости известного конденсатора C_0 указано на съемном блоке. (Проверить наличие съемного блока на установке, а также его соответствие данной работе).

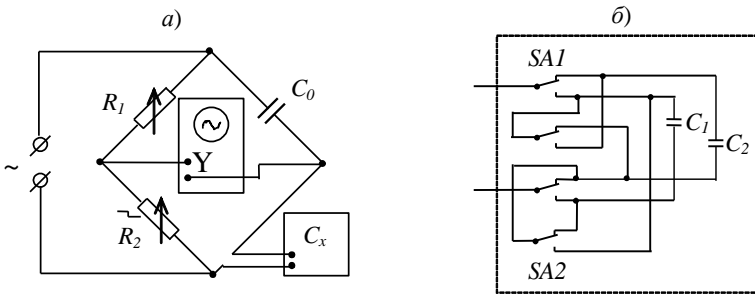


Рисунок 3

В зависимости от положений переключателей $SA1$ и $SA2$ в измерительное плечо моста (BD на рисунке 1) можно подключить либо конденсатор C_1 , либо C_2 , либо цепь, состоящую из их последовательного или параллельного соединения. Соответствующие положения переключателей показаны на рисунке 4.

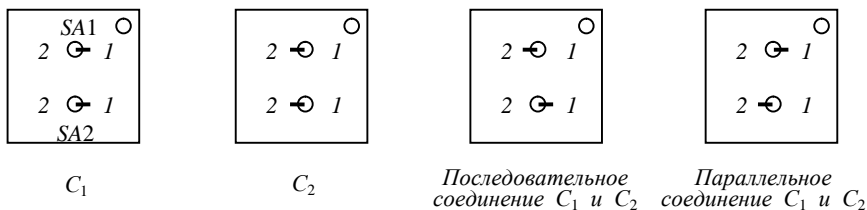


Рисунок 4

3 Порядок выполнения работы

1 Ознакомьтесь с "Краткой инструкцией по работе с осциллографом" и определите, где находятся его основные переключатели и регулировочные элементы. По указанию лаборанта отключите развертку осциллографа.

2 Подключите вилку сетевого провода в сетевую розетку, а затем включите сетевые выключатели источника напряжения и осциллографа; дайте установке прогреться в течение одной минуты.

3 Получите указание преподавателя, для каких и скольких значений сопротивления R_2 производить все последующие измерения (преподаватель указывает номера положений переключателя 2; соответствующие значения сопротивления R_2 определяются из таблицы, которая находится на установке).

4 С помощью переключателя 2 установите одно из заданных значений сопротивления и для случая, когда в диагональ моста включен конденсатор C_1 (см. рисунок 4). С помощью магазина сопротивлений 5 подберите такое значение сопротивления R_1 , чтобы амплитуда напряжения в диагонали моста (наблюдаемого на экране осциллографа) приняла минимальное значение. Рекомендуется при уменьшении амплитуды на экране с помощью делителя входного напряжения увеличивать усиление для достижения большей точности.

Занесите данные в таблицу 1 и рассчитайте неизвестное сопротивление по формуле (5).

Проделайте подобные измерения для всех заданных положений переключателя 2.

Таблица 1

Номера положений переключателя 2	R_2 , Ом	R_1 , Ом	C , мкФ	$\langle C \rangle$, мкФ	ΔC , мкФ
Измеряется емкость конденсатора C_1					
Измеряется емкость конденсатора C_2					
Измеряется емкость батареи последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_2					
Измеряется емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов C_1 и C_2					

5 Повторите п. 3 еще три раза (соответственно для случая подключения в диагональ моста конденсатора C_2 ; последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_2 ; параллельно соединенных этих же конденсаторов). Все данные и результаты расчетов занесите в соответствующие разделы таблицы 1.

6 Выключите установку в порядке, обратном изложенному в п. 1.

7 Для каждого из четырех случаев определите среднее значение емкости $\langle C \rangle$, погрешности отдельных измерений ΔC , а также среднеквадратичную погрешность S и полуширину доверительного интервала Δ для доверительной вероятности $P = 0,95$ по формулам, которые приведены на плакате в лаборатории. Средние значения емкостей и соответствующие полуширины доверительного интервала для батарей занесите в таблицу 2.

Результат в каждом из четырех случаев представьте в виде

$$C = \langle C \rangle \pm \Delta \quad \text{при} \quad P = 0,95.$$

8 Рассчитайте теоретические значения емкостей батареи из двух конденсаторов при их последовательном и параллельном соединениях по формулам (6)

$$C_{\text{посл}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \quad C_{\text{парал}} = C_1 + C_2, \quad (6)$$

используя измеренные значения C_1 и C_2 (соответствующие средние величины). Результаты занесите в таблицу 2. После анализа полученных результатов сделайте вывод о точности измерений.

Таблица 2

Соединение конденсаторов	$\langle C \rangle$	Δ	Теоретическое значение емкости по формулам (6)
	Φ		
Последовательное			
Параллельное			

Контрольные вопросы

1 Что такое конденсатор, какие бывают его виды? Что такое емкость конденсатора, от каких параметров и как она зависит, что служит ее единицей в СИ и как она связана с другими единицами?

2 Что такое квазистационарные токи и в каких случаях их можно считать таковыми?

3 Рассмотрите работу омического и емкостного делителей напряжения. Выведите формулы (2) и (3).

4 Обоснуйте метод определения емкости неизвестного конденсатора с помощью моста переменного тока. Выведите формулу (5).

5 Что такое равновесие моста переменного тока, как оно контролируется в идеальном случае и при практических измерениях?

6 Какие типы конденсаторов применяются на практике, как они устроены? Выведите формулы для емкостей плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.

7 Какие бывают простейшие соединения конденсаторов в батарее (см. описание к лабораторной работе № 3.3)? Выведите соотношения (6).

8 В чем заключается метод измерения емкости неизвестного конденсатора, применяемый в данной работе? Какие и как для этого измеряются физические величины?

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МОСТОВЫМ МЕТОДОМ

Цель работы. Изучить устройство и работу моста постоянного тока, измерить сопротивления резисторов при их параллельном и последовательном соединениях.

1 Краткие сведения из теории

По классическим представлениям при протекании электрического тока по проводнику происходят постоянные столкновения носителей тока с другими частицами (в металлах – электронов с ионами и атомами). При этом кинетическая энергия направленного движения носителей передается хаотическому (тепловому) движению атомов и молекул проводника. Эта передача происходит тем интенсивнее, чем больше нарушений в структуре проводника, т. е. чем больше в нем примесей и других дефектов правильной кристаллической решетки, а также чем сильнее происходят тепловые колебания атомов (больше температура).

Равновесие (равенство поступления энергии от источника и передачи ее во внутреннюю энергию) наступает при определенной силе тока, которая тем меньше, чем интенсивнее идет передача. Поэтому говорят, что проводник "противодействует" электрическому току. Параметр, характеризующий это противодействие, называется **электрическим сопротивлением** (или просто сопротивлением).

Для точного определения величины сопротивления используют закон Ома для однородного (в смысле отсутствия сторонних сил) участка проводника (здесь однородным называется участок, на котором на носители тока не действуют сторонние силы). Этот закон заключается в том, что напряжение между концами проводника U пропорционально силе протекающего по нему тока J :

$$U = RJ. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности R и называется сопротивлением. Это скалярная величина, равная отношению напряжения к силе тока. Единицей сопротивления служит 1 Ом, равный сопротивлению

такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет ток силой 1 А.

В общем случае сопротивление зависит от материала проводника, его размеров и формы. Для однородного по составу проводника длиной l при постоянной площади поперечного сечения S $R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ – удельное сопротивление, характеризующее материал. Его значения для использующихся на практике материалов можно найти в справочниках. В электротехнике и теоретических работах по физике часто вместо ρ вводят удельную проводимость $\sigma = \frac{1}{\rho}$.

На практике используют соединение нескольких проводников в различные батареи; простейшими из соединений являются параллельное и последовательное. Для последовательного (при этом конец первого проводника соединяется с началом второго и т. д.) соединения двух проводников (для электрических схем их чаще называют резисторами) (рисунок 1) формулы замещения (замена батареи одним эквивалентным резистором) имеют вид:

$$U = U_1 + U_2, \quad I = I_1 = I_2, \quad (2)$$

где U – напряжение между концами эквивалентного резистора; I – сила тока в нем; U_1 и U_2 – напряжения на каждом из резисторов; I_1 и I_2 – силы тока в соответствующих резисторах.

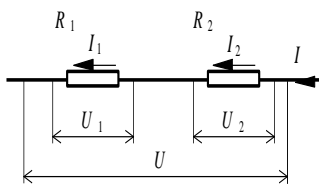


Рисунок 1

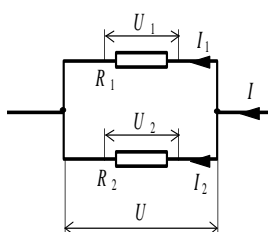


Рисунок 2

Из формул (2) с помощью определяющего соотношения (1) можно получить выражение для сопротивления эквивалентного резистора R :

$$R = R_1 + R_2. \quad (3)$$

Для параллельного (начала и концы проводников имеют общие точки подключения) соединения двух резисторов (рисунок 2) соответствующие формулы замещения и вывод для сопротивления эквивалентного резистора имеют вид:

$$U = U_1 = U_2, \quad I = I_1 + I_2, \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (4)$$

Обобщение формул (2), (3) и (4) на случай трех и более конденсаторов очевидно.

Практически все методы измерения сопротивлений можно условно разделить на две группы: расчет по закону Ома (1) или сравнение с известным сопротивлением. В методах первой группы на результат оказывают влияние погрешности измерительных приборов и нестабильность их показаний при изменении внешних условий (например, температуры) с течением времени.

Один из методов второй группы состоит в использовании мостовой схемы (мост Уитстона на рисунке 3). Мост постоянного тока представляет собой прямоугольник из четырех сопротивлений, в одну из диагоналей которого включен источник постоянного тока, а в другую — чувствительный гальванометр. Достоинством метода является то, что измерения проводятся при равенстве нулю протекающего через гальванометр тока (такое состояние называется **равновесием моста**). Таким образом, гальванометр используется в качестве нуль-индикатора, и, следовательно, влияние погрешности приборов и их нестабильность практически устраняются.

Выведем условия равновесия моста Уитстона, пользуясь правилами Кирхгофа, которые заключаются в следующем:

1 Алгебраическая сумма токов в любом узле равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n J_i = 0, \quad (5)$$

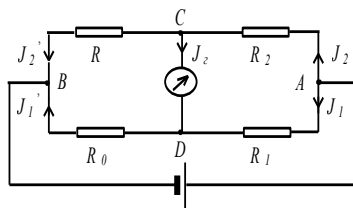


Рисунок 3

где n – число проводников, сходящихся к рассматриваемому узлу; i – номер проводника; J_i – сила тока в этом проводнике (алгебраическое значение).

2 Для любого замкнутого контура разветвленной электрической цепи алгебраическая сумма произведений сил тока на сопротивления соответствующих участков, т. е. сумма падений напряжения, равна алгебраической сумме электродвижущих сил, действующих в этом контуре,

$$\sum_{i=1}^n J_i R_i = \sum_{j=1}^m \mathcal{E}_j. \quad (6)$$

Здесь n – число участков замкнутого контура; i – номер участка; J_i – сила тока на i -м участке; R_i – сопротивление i -го участка; m – число элементов с ЭДС в контуре; j – номер элемента; \mathcal{E}_j – ЭДС j -го элемента.

Следует иметь в виду, что знаки сил токов в (5) зависят от того, входят они в узел или выходят из него (по соглашению). Число независимых уравнений (5) на единицу меньше, чем число узлов в цепи. Для корректной записи уравнения (6) необходимо сначала выбрать направление обхода соответствующего замкнутого контура.

В дальнейшем сила тока принимается положительной, если она совпадает по направлению с направлением обхода, и отрицательной в противоположном случае. Электродвижущая сила принимается положительной, если при движении в выбранном направлении обхода через соответствующий элемент (источник тока) в контуре потенциал повышается (движение идет от отрицательного полюса к положительному), и отрицательной в противном случае. Для того чтобы уравнения (6) были независимыми, необходимо, чтобы соответствующие контуры были независимы. Проще всего этого добиться, начав с одного контура, а затем переходить к другим контурам, заменяя один из участков на другие участки цепи, хотя бы один из которых ни разу не использовался в других контурах (до тех пор пока это возможно). Таким способом удастся получить все независимые контуры. Можно показать, что общее число независимых уравнений (5) и (6) равно числу неизвестных сил токов (участков цепи).

Для анализа цепи на рисунке 1 рассмотрим узлы C и D . Первые правила Кирхгофа запишутся для них следующим образом:

$$J_2 - J_2 - J'_2 = 0; \quad J_1 + J_2 - J'_1 = 0. \quad (7)$$

Вторые правила Кирхгофа запишем для независимых контуров *ADCA*

$$J_1 R_1 - J_{\Gamma} R_{\Gamma} - J_2 R_2 = 0 \quad (8)$$

и *DBCD*

$$J'_1 R_0 - J'_2 R + J_{\Gamma} R_{\Gamma} = 0, \quad (9)$$

где J_{Γ} и R_{Γ} – соответственно сила тока и сопротивление для гальванометра.

При равновесии моста $J_{\Gamma} = 0$. Подставляя в (7), получим $J'_2 = J_2$ и $J'_1 = J_1$. Тогда из (8) и (9) следует

$$J_1 R_1 = J_2 R_2; \quad J_1 R_0 = J_2 R.$$

Разделив второе уравнение на первое, получим уравнение равновесия моста в виде

$$\frac{R}{R_2} = \frac{R_0}{R_1}. \quad (10)$$

В данной работе сопротивления R_1 и R_2 выбраны переменными (ступенчатыми). С их помощью можно добиться равновесия моста для любого неизвестного сопротивления R , которое затем определяется из соотношения (10)

$$R = R_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (10a)$$

2 Оборудование и приборы

Установка (рисунок 4) состоит из источника постоянного напряжения I , на переднюю панель которого вынесен переключатель ступенчатого сопротивления R_2 2 (рисунок 5, *a*), а к верхней панели подключается съемный блок неизвестных сопротивлений 3 с переключателями $SA1$ и $SA2$ (рисунок 5, *б*); использу-

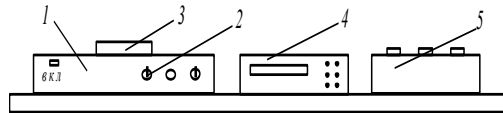


Рисунок 4

емого в качестве нуль-индикатора цифрового вольтметра 4 и магазина сопротивлений 5, который служит в качестве специального сопротивления R_1 с мелкоступенчатой регулировкой. Значение эталонного сопротивления R_0 указано на съемном блоке.

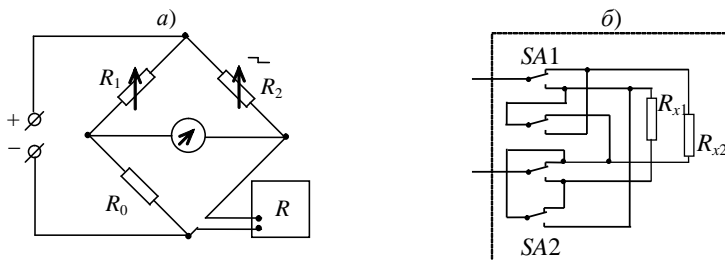


Рисунок 5

В зависимости от положений переключателей (рисунок 6) SA1 и SA2 в измерительное плечо моста (BC на рисунке 1) в качестве R можно подключить либо сопротивление R_{x1} , либо R_{x2} , либо цепь, состоящую из их последовательного или параллельного соединения. Соответствующие положения переключателей показаны на рисунке 5.

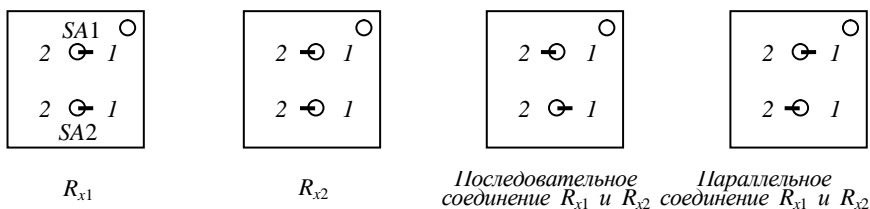


Рисунок 6

3 Порядок выполнения работы

1 Подключите вилку сетевого провода в сетевую розетку, а затем включите сетевые выключатели источника напряжения и амперметра (у него выключатель находится на задней панели прибора); дайте установке прогреться в течение одной минуты.

2 Получите указание преподавателя, для каких и скольких значений сопротивления R_2 производить все последующие измерения (преподаватель указывает номера положений переключателя 2; соот-

ветствующие значения сопротивления R_2 определяются из таблицы, которая находится на установке).

3 С помощью переключателя 2 установите одно из заданных значений сопротивления и для случая, когда в диагональ моста включено сопротивление R_{x1} (см. рисунок б), с помощью магазина сопротивлений 5 добейтесь (подберите сопротивление R_1) нулевого тока, протекающего через амперметр. Занесите данные в таблицу 1 и рассчитайте неизвестное сопротивление по формуле (10а). Прделайте подобные измерения для всех заданных положений переключателя 2.

Таблица 1

Номера положений переключателя 2	R_2	R_1	R	$\langle R \rangle$	ΔR
	Ом				
Измеряется сопротивление R_{x1}					
Измеряется сопротивление R_{x2}					
Измеряется сопротивление батареи последовательно соединенных R_{x1} и R_{x2}					
Измеряется сопротивление батареи параллельно соединенных R_{x1} и R_{x2}					

4 Повторите п. 3 еще три раза (соответственно для случая подключения в диагональ моста сопротивления R_{x2} ; последовательно соединенных сопротивлений R_{x1} и R_{x2} ; параллельно соединенных этих же сопротивлений). Все данные и результаты расчетов занесите в соответствующие разделы таблицы 1.

5 Выключите установку в порядке, обратном изложенному в п. 1.

6 Для каждого из четырех случаев определите среднее значение сопротивления $\langle R \rangle$, погрешности отдельных измерений ΔR , а также среднеквадратичную погрешность S и полуширину доверительного

интервала Δ для доверительной вероятности $P = 0,95$ по формулам, которые приведены на плакате в лаборатории.

Результат в каждом из четырех случаев представьте в виде

$$R = \langle R \rangle \pm \Delta \quad \text{при} \quad P = 0,95.$$

7 Рассчитайте теоретическое значение сопротивлений батареи из двух резисторов при их последовательном и параллельном соединениях по формулам:

$$R_{\text{послед}} = R_{x1} + R_{x2}, \quad R_{\text{парал}} = \frac{R_{x1}R_{x2}}{R_{x1} + R_{x2}}, \quad (11)$$

используя измеренные значения R_{x1} и R_{x2} (соответствующие средние величины). Результаты представьте в виде таблицы 2. После анализа полученных результатов сделайте вывод о точности измерений.

Таблица 2

Соединение сопротивлений	$\langle R \rangle$	Δ	Расчетное значение сопротивления
	Ом		
Последовательное			
Параллельное			

Контрольные вопросы

1 Что такое сопротивление и в чем состоит причина его появления? В каких единицах оно измеряется?

2 Как сопротивление металлов зависит от температуры? Что такое сверхпроводимость?

3 Сравните различные методы определения электрических сопротивлений.

4 Сформулируйте правила Кирхгофа и объясните порядок их применения.

5 Рассмотрите работу моста Уитстона и выведите формулу (10).

6 Какие бывают соединения сопротивлений? Выведите соотношения (11) для их последовательного и параллельного соединений.

РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНОВ ИЗМЕРЕНИЙ У АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Цель работы. Изучить подключения внешних резисторов к амперметру и вольтметру, рассчитать внутренние сопротивления этих приборов. Определить необходимые значения шунта и добавочного сопротивления для расширения диапазонов измерений силы тока и напряжения.

1 Краткие сведения из теории

Расширение диапазона измерений – приспособливание измерительного механизма (в данной работе – амперметра или вольтметра) к данной измерительной задаче.

Измерительный механизм, имеющий собственное сопротивление, характеризуется некоторым предельным значением силы тока или соответствующим силе тока предельным значением напряжения, которое обеспечивает полное отклонение указателя (стрелки). Если требуется измерять токи или напряжения, превышающие предельные значения, то необходимо параллельно или последовательно с измерительным механизмом подключать дополнительные резисторы. При этом соответствующим образом увеличивается и цена деления шкалы (*значение измеряемой величины, соответствующее одному делению шкалы*) прибора.

Различают *расширение диапазона измерений по току* и *расширение диапазона измерений по напряжению*. Путем комбинации измерительного механизма с рассчитанным значением сопротивления дополнительного резистора можно получить амперметр или вольтметр.

Расширение диапазона измерения тока – расширение диапазона измерения у амперметров.

Амперметр обладает собственным сопротивлением R_A . Он включается в цепь последовательно. Полное отклонение стрелки обеспечивается максимальным током I_A . Если необходимо измерять большие токи, то параллельно амперметру подключается шунтирующий

резистор (шунт), сопротивление которого $R_{\text{ш}}$ таково, чтобы через амперметр протекал только ток I_A (рисунок 1, *a*).

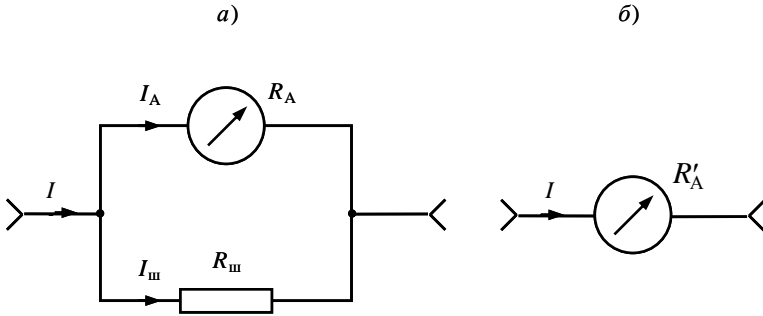


Рисунок 1

На основании правил Кирхгофа (для узла, где разветвляются токи, и для контура, составленного из амперметра и шунта)

$$\begin{aligned} I &= I_A + I_{\text{ш}}; \\ I_A R_A &= I_{\text{ш}} R_{\text{ш}}, \end{aligned}$$

можно определить сопротивление шунта

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{\frac{I}{I_A} - 1}, \quad (1)$$

где I – конечное значение нужного диапазона измерения силы тока; $I_{\text{ш}}$ – сила тока, протекающего через шунт.

Если предел измерения тока необходимо увеличить в n раз ($I = nI_A$), то из (1) следует

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n-1}. \quad (2)$$

При параллельном подключении шунта к амперметру можно считать, что появился новый амперметр (рисунок 1, *б*) с внутренним сопротивлением

$$R'_A = \frac{R_A R_{\text{ш}}}{R_A + R_{\text{ш}}}.$$

При этом $R'_A < R_{ш} \leq R_A$. Если шунт рассчитан на относительно небольшую силу тока (до 30 А), то его обычно встраивают в корпус прибора, и пользователь воспринимает его (этот прибор) как единый амперметр с внутренним сопротивлением R'_A .

Из уравнения (2) видно, что для вычисления сопротивления шунта необходимо знать величину внутреннего сопротивления амперметра. Ее определяют с помощью схемы (рисунок 2), в которой A_1 – амперметр, для которого рассчитывается внутреннее сопротивление; A – амперметр, принятый за эталон.

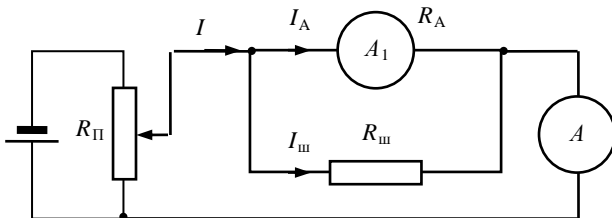


Рисунок 2

Роль шунта в схеме выполняет магазин сопротивлений. Из уравнения (1) следует

$$R_A = R_{ш} \left(\frac{I}{I_A} - 1 \right). \quad (3)$$

Расширение диапазона измерения напряжения – расширение диапазона измерения у вольтметров.

Вольтметр обладает сопротивлением R_B . Он включается в цепь параллельно к исследуемому участку. Наибольшее отклонение стрелки возникает при напряжении U_B , которое создает максимальный ток I в измерительном механизме. Если необходимо измерить более высокое напряжение, то последовательно с вольтметром подключается дополнительный резистор (добавочное сопротивление), сопротивление которого R_d таково, чтобы на вольтметре падало напряжение не более U_B (рисунок 3, а).

На основании закона Ома для однородных участков цепи (для вольтметра и для всего участка, включающего вольтметр и добавоч-

ное сопротивление) с учетом того, что сила тока в этих элементах одинакова, можно записать

$$I = \frac{U_B}{R_B} = \frac{U}{R_B + R_d},$$

откуда следует

$$R_d = R_B \left(\frac{U}{U_B} - 1 \right), \quad (4)$$

где U – конечное значение нужного диапазона измерения напряжения.

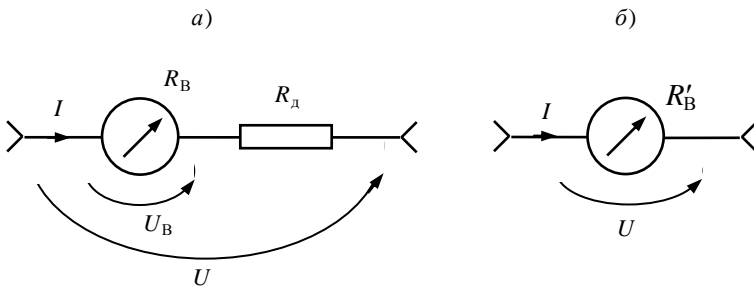


Рисунок 3

Если предел измерения необходимо увеличить в n раз ($U = nU_B$), то

$$R_d = R_B(n - 1). \quad (5)$$

При последовательном подключении добавочного сопротивления к вольтметру можно считать, что появился новый вольтметр (рисунок 3, б) с внутренним сопротивлением

$$R'_B = R_B + R_d.$$

При этом $R'_B > R_d \geq R_B$. Добавочные сопротивления бывают наружные и внутренние, встраиваемые в корпус прибора. В последнем случае пользователь воспринимает его как единый вольтметр с внутренним сопротивлением R'_B .

Из формулы (5) видно, что для вычисления величины добавочного сопротивления необходимо знать величину сопротивления вольтметра. Ее можно определить с помощью схемы (рисунок 4), в которой V_1 – вольтметр, для которого определяется внутреннее сопротивление; V – вольтметр, принятый за эталон.

Роль добавочного сопротивления выполняет магазин сопротивлений. Из уравнения (4) следует

$$R_B = \frac{R_d}{\frac{U}{U_B} - 1}. \quad (6)$$

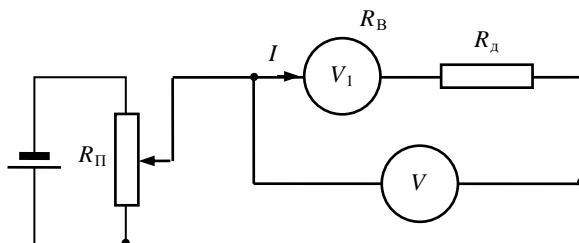


Рисунок 4

2 Оборудование и приборы

Источник питания, потенциометр, магазин сопротивлений, амперметры A и A_1 , вольтметры V и V_1 , соединительные провода.

3 Порядок выполнения работы

1 Собрать схему, показанную на рисунке 2. Рассчитать значение цены деления шкалы амперметра A_1 .

2 На магазине сопротивлений установить некоторое значение сопротивления $R_{ш}$ и включить схему. Движок потенциометра установить в такое положение, при котором стрелка амперметра A_1 отклонится примерно до середины шкалы.

3 При трех значениях сопротивления магазина $R_{ш}$ (из заданного преподавателем диапазона) по амперметру A произвести измерения силы тока I в общей цепи, по амперметру A_1 – силы тока I_A .

4 С помощью формулы (3) вычислить значения сопротивления амперметра R_A и определить его среднее значение $\langle R_A \rangle$. Вычислить среднюю квадратичную погрешность S и полуширину доверительного интервала Δ при заданном преподавателем значении доверительной вероятности. Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	$R_{ш}, \text{Ом}$	$I, \text{А}$	$I_1, \text{А}$	$R_A, \text{Ом}$	$\langle R_A \rangle, \text{Ом}$	$S, \text{Ом}$
1						
2						
3						

5 При заданных преподавателем двух значениях коэффициента расширения диапазона измерения амперметра n по формуле (2) рассчитать соответствующие сопротивления шунтов.

Для каждого из этих значений n с помощью переключателей магазина сопротивлений выставить рассчитанное значение сопротивления шунта и включить схему. Проверить правильность показаний амперметра A_1 с учетом соответствующего расширения его диапазона. Рассчитать значение цены деления шкалы (K_A) амперметра A_1 при этих двух условиях. Результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

n	$\langle R_A \rangle, \text{Ом}$	$R_{ш}, \text{Ом}$	$I, \text{А}$	$I_1, \text{А}$	I/I_1	$K_A, \text{А/дел.}$

6 Собрать схему, показанную на рисунке 4. Рассчитать значение цены деления шкалы вольтметра V_1 . На магазине сопротивлений установить некоторое значение сопротивления R_d и включить схему.

7 Движок потенциометра установить в такое положение, при котором стрелка вольтметра V_1 отклонится примерно до середины шкалы.

8 При трех значениях сопротивления магазина R_d (из заданного преподавателем диапазона) по вольтметру V замерить напряжение U , по вольтметру V_1 – напряжение U_B .

9 С помощью формулы (6) вычислить значения сопротивления вольтметра R_B и определить его среднее значение $\langle R_B \rangle$. Вычислить

среднюю квадратичную погрешность S и полуширину доверительного интервала Δ при заданном преподавателем значении доверительной вероятности. Результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3

№ п/п	R_d , Ом	U , В	U_1 , В	R_B , Ом	$\langle R_B \rangle$, Ом	S , Ом
1						
2						
3						

10 При заданных преподавателем двух значениях коэффициента расширения диапазона измерений вольтметра n по формуле (5) определить соответствующие значения добавочного сопротивления.

Поочередно набрать на магазине сопротивлений их значения и проверить правильность показаний вольтметра V_1 с учетом соответствующего расширения его диапазона. Рассчитать значение цены деления шкалы (K_B) вольтметра V_1 при этих условиях. Результаты занести в таблицу 4.

Таблица 4

n	$\langle R_B \rangle$, Ом	R_d , Ом	U , В	U_1 , В	U/U_1	K_B , В/дел.

11 Окончательный результат представить в виде:

$$R_A = (\langle R_A \rangle \pm \Delta) \text{ Ом при } P = \dots;$$

$$R_B = (\langle R_B \rangle \pm \Delta) \text{ Ом при } P = \dots$$

Контрольные вопросы

1 Что называется однородным участком электрической цепи, как для него формулируется закон Ома?

2 Как формулируются правила Кирхгофа для разветвленной электрической цепи и как записываются соответствующие уравнения?

3 Как определялись значения внутреннего сопротивления амперметра и вольтметра в лабораторной работе?

4 Почему внутреннее сопротивление амперметра должно быть относительно малым, а вольтметра – большим?

5 Для чего шунтируется амперметр и как вывести соотношение для расчета сопротивления шунта?

6 Как вывести соотношение для расчета добавочного сопротивления? Для чего оно используется?

Лабораторная работа № 3.7

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы. Изучить зависимость полезной мощности и КПД источника от величины нагрузки, определить его ЭДС и внутреннее сопротивление.

1 Краткие сведения из теории

Потенциальные силы электростатического поля не могут поддерживать постоянный ток в электрической цепи, так как их работа по замкнутому пути равна нулю, а прохождение тока по проводникам сопровождается выделением энергии – нагреванием проводников. Поэтому действие электростатического поля может привести только к такому распределению свободных зарядов, при котором потенциалы во всех точках цепи станут равными, а само электростатическое поле исчезнет.

Таким образом, для поддержания постоянного тока в электрической цепи на заряды должны действовать еще какие-то неконсервативные силы неэлектростатической природы (некулоновские силы). Эти силы называются **сторонними**. Они вызывают разделение зарядов и поддерживают разность потенциалов на концах (клеммах) источников тока (устройств, где сосредоточено действие сторонних сил). (Во избежание путаницы под источником тока понимается любой источник электрической энергии).

Происхождение сторонних сил может быть различным: в генераторах – это силы со стороны вихревого электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля, или силы Лоренца, действующие со стороны магнитного поля на электроны в движущихся проводниках; в гальванических элементах и аккумуляторах – это химические силы и т. д.

Действие сторонних сил характеризует **электродвижущая сила** \mathcal{E} (ЭДС). По определению, она численно равна работе сторонних сил A' по перемещению в замкнутой электрической цепи единичного положительного заряда q и измеряется в вольтах:

$$\mathcal{E} = \frac{A'}{q}. \quad (1)$$

Вторым параметром, характеризующим источник тока, является его **внутреннее сопротивление** r , которое можно определить как отношение напряжения между клеммами источника U' (измеренное для перемещения заряда по пути, проходящему внутри источника) и силы тока (это напряжение часто называют падением напряжения внутри источника)

$$r = \frac{U'}{J}. \quad (2)$$

Напряжение в общем случае определяется работой кулоновских и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда между двумя точками. А так как сторонние силы не являются потенциальными (их работа зависит от пути), то напряжение между двумя точками может зависеть от пути, по которому совершается перемещение заряда.

В нашем случае напряжение на зажимах источника тока U при перемещении заряда по внешней цепи равно разности потенциалов между этими точками $\varphi_2 - \varphi_1$ (т. к. вне источника сторонние силы не действуют, а кулоновские силы – потенциальны) и в соответствии с законом Ома для однородного участка определяется сопротивлением внешней цепи R (нагрузкой)

$$U = JR = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (3)$$

Для замкнутой цепи, содержащей источник тока (рисунок 1), запишем второе правило Кирхгофа

$$U + U' = \mathcal{E},$$

откуда с учетом (2) и (3) получим закон Ома для полной (замкнутой) цепи)

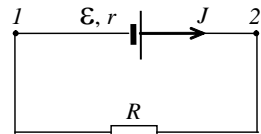


Рисунок 1

$$J = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (4)$$

Для исследования источника тока чаще всего используют два режима:

1 Режим **холостого хода**. При этом внешняя цепь разомкнута ($R \rightarrow \infty$). Как следует из (4), при этом $J = 0$, $U = \mathcal{E}$. На использовании этого режима основан один из методов определения ЭДС: измерение напряжения на зажимах источника вольтметром, имеющим очень большое собственное сопротивление ($R \gg r$).

2 Режим **короткого замыкания**. При этом зажимы источника тока соединены проводником, сопротивлением которого можно пренебречь ($R = 0$). Для этого режима $U = 0$, а $J = J^*$, где J^* – сила тока короткого замыкания

$$J^* = \frac{\mathcal{E}}{r}. \quad (5)$$

Один из способов определения внутреннего сопротивления источника тока основан на использовании соотношения (5). Для многих источников тока (например, аккумуляторов) режим короткого замыкания недопустим, т. к. при этом они выходят из строя.

В данной работе специально используется источник с относительно большим внутренним сопротивлением для возможности работы в режиме короткого замыкания.

Анализ работы источника электрической энергии часто проводят, исследуя зависимость напряжения на его зажимах от силы протекающего тока (рисунок 2). Из соотношений (3) и (4) следует, что она должна иметь линейный характер, проходя через две точки: $J = 0$, $U = \mathcal{E}$ (на оси U) и $J = J^*$, $U = 0$ (на оси J). Ее наклон определяется значением внутреннего сопротивления источника.

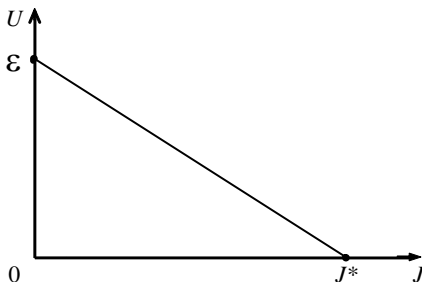


Рисунок 2

Умножим обе части уравнения (4) на силу тока в цепи J . После преобразования получим

$$J^2 R + J^2 r = \mathcal{E} J. \quad (6)$$

Соотношение (6) выражает закон сохранения энергии при работе источника тока на внешнюю нагрузку, т. к.

$$N_R = J^2 R \quad (6a)$$

мощность, выделяемая во внешней цепи (полезная мощность); $J^2 r$ – мощность, выделяемая в виде тепла внутри источника тока; $\mathcal{E}J$ – полная мощность, развиваемая источником. Как следует из (1), последнее слагаемое в (6) представляет собой мощность сторонних сил.

Отношение полезной мощности к полной называется **коэффициентом полезного действия** (КПД) источника тока η . Из уравнений (6) и (3) следуют три формулы для коэффициента полезного действия

$$\eta = \frac{J^2 R}{\mathcal{E}J} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R+r}. \quad (7)$$

После их преобразований можно получить

$$\eta = 1 - \frac{J}{J^*}. \quad (8)$$

Анализ выражений (7) и (8) показывает, что при нулевом сопротивлении внешней цепи ($R = 0, J = J^*$) КПД равно нулю ($\eta = 0$); далее КПД монотонно возрастает при увеличении сопротивления R (уменьшении силы тока J) и монотонно стремится к единице (100 %) ($\eta \rightarrow 1$) при стремлении сопротивления внешней цепи к бесконечности ($R \rightarrow \infty, J \rightarrow 0$), что соответствует переходу к режиму холостого хода.

При использовании (4) для полезной мощности можно получить два полезных соотношения:

$$N_R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2} = J\mathcal{E} - J^2 r. \quad (9)$$

Из них следует, что при $R = 0$ ($J = J^*$), а также при $R = \infty$ ($J = 0$) $N_R = 0$, в то же время $N_R > 0$ при промежуточных значениях сопротивления. Следовательно, полезная мощность немонотонно зависит от величины нагрузки (от силы тока).

Вясним, при каких условиях полезная мощность принимает максимальное значение. Это можно сделать двумя способами: выбрав для нее в качестве независимой переменной либо сопротивление нагрузки R , либо силу тока J . На рисунке 3 представлены графики зависимостей по соотношениям (7)–(9).

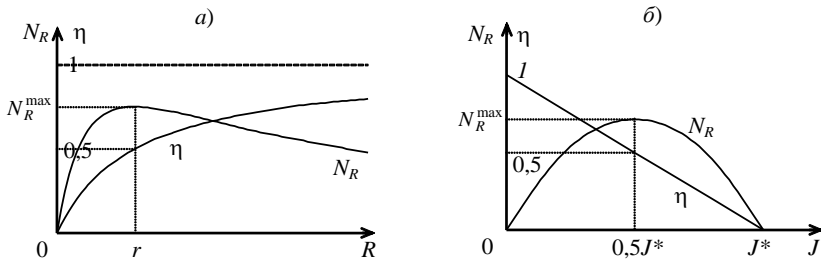


Рисунок 3

При выборе в качестве независимой переменной сопротивления нагрузки R (первый подход) экстремальное условие имеет вид

$$\frac{dN_R(R)}{dR} = \varepsilon^2 \frac{(R+r)^2 - 2(R+r)R}{(R+r)^4} = \varepsilon^2 \frac{r-R}{(R+r)^3} = 0,$$

откуда следует, что $R = r$ (при этом выполняется необходимое условие экстремума). Далее по знаку производной (при $R < r$ $\frac{dN_R(R)}{dR} > 0$ и

при $R > r$ $\frac{dN_R(R)}{dR} < 0$) можно сделать вывод, что полученный экстремум действительно является максимумом (выполняется достаточное условие максимума). Так как других корней у производной на интервале $(0, \infty)$ нет, то этот максимум является единственным. Из (7)

получаем, что при этом $J = \frac{\varepsilon}{2r} = \frac{1}{2} J^*$, а из (8), что $\eta = 0,5$.

При втором подходе (в качестве независимой переменной выбирается сила тока J) условие максимума имеет вид

$$\frac{dN_R(J)}{dJ} = \varepsilon - 2Jr = 0 \quad \left(\frac{d^2 N_R(J)}{dJ^2} = -2r < 0 \right),$$

откуда следует, что $J = 0,5J^*$, т. е. приходим к тем же параметрам, соответствующим максимальной полезной мощности,

$$R = r; J = 0,5J^*; \eta = 0,5. \quad (10)$$

При этом

$$N_R = N_R^{\max} = \frac{1}{4} \varepsilon J^*. \quad (11)$$

2 Оборудование и приборы

Установка (рисунок 4) состоит из постоянного блока 1, на передней панели которого находится переключатель источников тока 2, съемного блока 3, амперметра 4 и магазина сопротивлений 5.

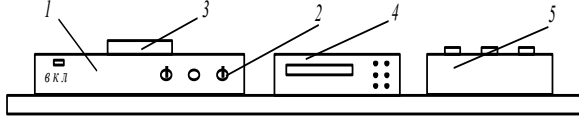


Рисунок 4

Используемый в данной работе цифровой амперметр

автоматически выбирает предел измерения силы тока, что контролируется по зажиганию индикаторной лампочки против соответствующей единицы (мкА или mA).

3 Порядок выполнения работы

1 Подключите вилку сетевого провода в сетевую розетку, а затем включите сетевые выключатели блока 1 и амперметра (у него выключатель находится на задней панели прибора) и дайте установке прогреться в течение одной минуты.

2 По указанию преподавателя установите переключатель 2, выбрав тем самым параметры источника тока, который будет исследоваться в работе.

3 Измерьте силу тока короткого замыкания J^* . Затем подберите на магазине значение сопротивления, при котором сила тока будет примерно в два раза меньше ($J \approx 0,5J^*$). В соответствии с (10) это сопротивление будет приближенно равно внутреннему сопротивлению источника тока r .

4 Сделайте еще по пять измерений силы тока в диапазоне сопротивлений от 0 до r и от r до $5r$, разделяя их примерно равномерно. Для всех этих значений J и R (по 12 чисел) рассчитайте напряжение U по (3), полезную мощность N_R по (6а) и КПД η по (8). Все данные занесите в таблицу 1.

Таблица 1

R , Ом	J , мА	U , В	N_R , мВт	η

5 Постройте по экспериментальным точкам график зависимости $U(J)$ (см. рисунок 2). Убедитесь в том, что точки лежат близко к одной прямой линии. По ее пересечению с осью U определите \mathcal{E} ЭДС. Уточните значение r по формуле (5).

6 Постройте по экспериментальным точкам графики зависимостей $N_R(R)$, $\eta(R)$ и $N_R(J)$, $\eta(J)$ (см. рисунок 3). Проверьте выполнение для точки максимума N_R условий (10). Рассчитайте теоретическое значение

N_R^{\max} по (11) и сравните его с величиной N_R при $R = r$.

7 Постройте по экспериментальным точкам график зависимости $\frac{1}{J}(R)$ (рисунок 5). Убедитесь в том, что все точки лежат близко к одной прямой линии. По ее наклону рассчитайте ЭДС

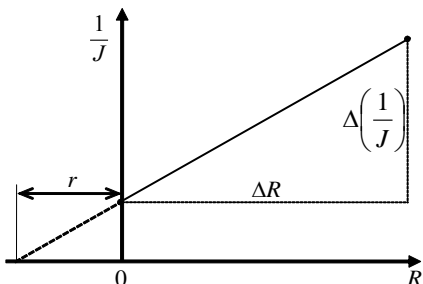


Рисунок 5

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta R}{\Delta\left(\frac{1}{J}\right)},$$

где ΔR и $\Delta\left(\frac{1}{J}\right)$ – изменения соответствующих величин для двух точек прямой, находящихся максимально далеко друг от друга. Сравните с ранее определенным значением. По точке пересечения этой прямой с осью R рассчитайте внутреннее сопротивление r (см. рисунок 5) и сравните с ранее определенными значениями.

8 Проведите анализ вычисленных различными способами значений параметров источника тока (\mathcal{E} , r , J^* , N_R^{\max}). Сделайте вывод о точности измерений.

Контрольные вопросы

1 Почему для поддержания постоянного тока в электрической цепи необходимы сторонние силы, каковы их свойства и чем характеризуется их действие? Приведите примеры.

2 Какими основными параметрами характеризуется источник тока и как они определяются?

3 Запишите все законы Ома, которые Вы знаете, и покажите, как из одних законов вытекают другие (например, из интегральных дифференциальные и т. п.).

4 Как проводится анализ работы источника постоянного тока? Дайте определения используемых при этом физических величин и приведите связь между ними.

5 Что такое КПД источника тока, какие есть для этой величины выражения и как она зависит от других параметров (J , R и т. п.)?

Лабораторная работа № 3.8

ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы. Изучить зависимость полезной мощности, КПД источника и тока от нагрузки.

1 Краткие сведения из теории

Если в проводнике (рисунок 1) создать электрическое поле (разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 > 0$) и не принять мер для его поддержания, то перемещение носителей тока приведет к тому, что поле внутри проводника исчезнет и ток прекратится.

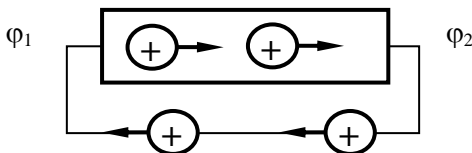


Рисунок 1

Для того чтобы поддерживать ток длительное время, от конца проводника с меньшим потенциалом (носители тока предполагаются положительными) нужно непрерывно отводить приносимые сюда с током заряды, а к концу с большим потенциалом – непрерывно их подводить.

Кулоновские силы взаимодействия между зарядами приводят к такому распределению свободных зарядов, при котором электрическое поле в проводнике исчезает, а потенциалы во всех точках выравниваются. Поэтому поле кулоновских сил не может вызвать стационарный процесс упорядоченного движения зарядов, т. е. не может являться причиной возникновения постоянного электрического тока. Очевидно, что для поддержания постоянного тока в цепи на свободные заряды должны действовать помимо кулоновских сил еще какие-то иные, неэлектрические силы. Эти силы носят название **сторонних сил**. Если кулоновские силы вызывают соединение разноименных зарядов, что ведет к выравниванию потенциалов и исчезновению электрического поля в проводнике, то сторонние силы вызывают разделение разноименных зарядов и поддерживают разность потенциалов на концах проводника.

Природа сторонних сил может быть различна. В электрофорной машине разделение зарядов происходит за счет механической работы, в генераторах электрического тока разделение зарядов осуществляется силами магнитного поля, в гальванических элементах и аккумуляторах – за счет химических процессов.

Перемещая заряды, сторонние силы совершают работу за счет энергии, затрачиваемой в источнике тока. Сторонние силы можно охарактеризовать работой, которую они совершают над перемещающимися по цепи зарядами.

Величина, численно равная работе сторонних сил по перемещению в замкнутой цепи единичного положительного заряда, называется электродвижущей силой \mathcal{E} (ЭДС). Следовательно, если работа сторонних сил над зарядом равна A' , то

$$\mathcal{E} = \frac{A'}{q},$$

где ЭДС измеряется в вольтах, A' – работа сторонних сил – измеряется в джоулях. Так как работа электростатических сил по замкнутому

контур равна нулю, то можно дать другое определение электродвижущей силы источника. Электродвижущая сила – физическая величина, численно равная работе, совершаемой силами при переносе единичного положительного заряда внутри источника тока от его отрицательного полюса к положительному, т. е.

$$\mathcal{E} = \int_1^2 E_{\text{стор}} dl,$$

где $E_{\text{стор}}$ – напряженность поля сторонних сил.

Пусть замкнутая цепь состоит из источника электрической энергии ЭДС \mathcal{E} с внутренним сопротивлением r , а также внешней цепи, имеющей сопротивление R (рисунок 2), то согласно закону Ома

$$J = \frac{\mathcal{E}}{R+r}, \quad \mathcal{E} = JR + Jr. \quad (1)$$

Умножая обе части равенства (1) на величину протекающего по цепи тока J , получим:

$$J^2 R + J^2 r = \mathcal{E} J. \quad (2)$$

В (1) и (2) $\mathcal{E}J$ – полная мощность, развиваемая источником тока; $J^2 R$ – мощность, выделяемая во внешней цепи (полезная мощность); $J^2 r$ – мощность, теряемая внутри источника; JR – падение напряжения на сопротивлении внешней цепи; Jr – падение напряжения внутри источника.

Из равенства (2) видно, что распределение мощности между внешней и внутренней частями цепи зависит только от соотношения между внешним и внутренним сопротивлением цепи. Отношение полезной мощности N_R и полной мощности N называется коэффициентом полезного действия (КПД) источника тока, т.е.

$$\eta = \frac{N_R}{N} = \frac{J^2 R}{J^2 R + J^2 r} = \frac{R}{R+r} = \frac{U}{\mathcal{E}}, \quad (3)$$

где $U = JR$ – падение напряжения на сопротивлении R .

На рисунке 2 приведена схема полной электрической цепи.

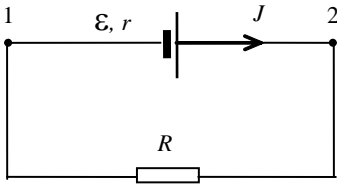


Рисунок 2

Анализируя соотношения (3), видим, что если $R = 0$, то $\eta = 0$ и $N_R = 0$ и если $R = \infty$, то $\eta = 1$ и $N_R = 0$. Следовательно, полезная мощность N_R имеет максимум при каком-то промежуточном значении R , лежащим между нулем и бесконечностью. Так как по физическому смыслу полезная мощность – величина существенно неотрицательная, то этот экстремум не может быть минимумом. Из соотношения (1) полезную мощность можно представить как функцию либо внешнего сопротивления R , либо как функцию силы тока J :

$$N_R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2} = J\varepsilon - J^2 r. \quad (4)$$

Значение внешнего сопротивления R , при котором полезная мощность будет максимальной, найдем из анализа первого уравнения в (4), т. е. необходимого условия экстремума функции $N_R(R)$:

$$\frac{dN_R(R)}{dR} = \varepsilon^2 \frac{(R+r)^2 - 2(R+r)R}{(R+r)^4} = \varepsilon^2 \frac{r-R}{(R+r)^3} = 0.$$

Отсюда следует, что полезная мощность имеет максимум при равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений цепи, т. е. при $R = r$. Учитывая это с помощью вышеприведенных соотношений (1)–(3), получим, что при максимальном значении полезной мощности, равной $N_R = \frac{\varepsilon^2}{4r}$, сила тока и КПД источника принимают значения

$$JR = U = \frac{\varepsilon}{2}, \quad \eta = \frac{1}{2}. \quad (5)$$

По второму уравнению в (4) полезная мощность является квадратичной функцией силы тока. Отсюда с помощью школьных знаний о параболе также легко получить все вышеприведенные выводы относительно условий и свойств искомого максимума.

Графики $N_R = f(R)$ и $\eta = f(R)$ представлены на рисунке 3.

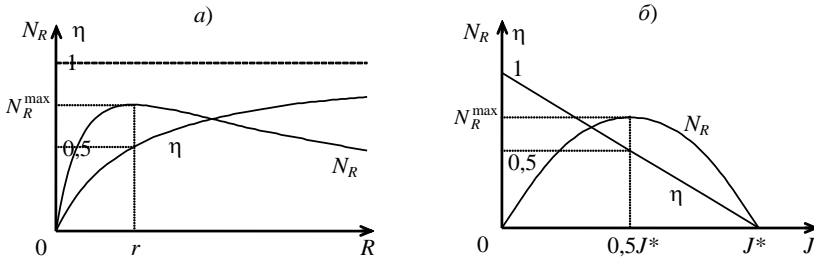


Рисунок 3

Из формулы (3) следует, что КПД источника тока стремится к единице, когда отношение внутреннего сопротивления к внешнему сопротивлению стремится к нулю. Поэтому для увеличения КПД необходимо по возможности уменьшить внутреннее сопротивление источника тока. Соответствующий график функции $J = f(R)$ представлен на рисунке 4.

Если $R \rightarrow \infty$ (цепь разомкнута), то $U = \mathcal{E}$. Отсюда следует, что электродвижущая сила равна напряжению на зажимах разомкнутого источника тока. Если

$R \rightarrow 0$, то $U = JR \rightarrow 0$. Для случая $R = 0$ ток в цепи называется током короткого замыкания. Сила тока короткого замыкания по уравнению (1)

$$J^* = \frac{\mathcal{E}}{r}. \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что величина силы тока короткого замыкания определяется значениями ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока, т. е. наряду с последними является его основным свойством

2 Оборудование и приборы

Установка, включающая вольтметр V , миллиамперметр mA , набор сопротивлений R , представлена на рисунке 5.

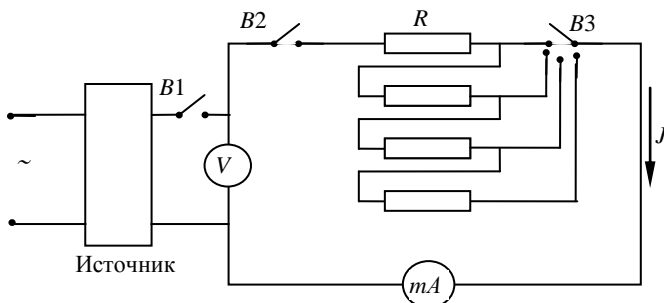


Рисунок 5

3 Порядок выполнения работы

1 Перед началом работы вывести переключатель R в положение нуль (до упора против часовой стрелки).

2 Включить сеть тумблером $B1$. Записать показания вольтметра. Так как сопротивление вольтметра в данной работе значительно больше внутреннего сопротивления источника тока, то это показание вольтметра приближенно можно считать равным ЭДС.

3 Включить тумблер $B2$ и, изменяя сопротивление R от нуля до 100 Ом с интервалом в 10 Ом, записать показания вольтметра U и миллиамперметра J в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	R , Ом	U , В	J , А	N_R , Вт	η

4 Выключить тумблеры $B1$ и $B2$, перевести переключатель в положение нуль.

5 Вычислить значение полезной мощности $N_R = J^2 R$, КПД $\eta = \frac{U}{\mathcal{E}}$

и результаты занести в таблицу 1.

6 По результатам эксперимента построить графики $N_R = f(R)$, $\eta = f_1(R)$ и $J = f_2(R)$.

7 Найти из графиков $N_R = f(R)$ и $J = f_2(R)$ значение внутреннего сопротивления источника питания r и ток короткого замыкания J^* .

8 Вычислить значения J и U при максимальном значении мощности.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое ЭДС источника тока и какими методами она измеряется?
- 2 Что такое сторонние силы и какова их роль в электрической цепи?
- 3 Как зависит ток в цепи, полезная мощность и КПД источника тока от внешней нагрузки?
- 4 При каких условиях полезная мощность равна нулю? При каких условиях она достигает максимального значения?
- 5 Какой ток называется током короткого замыкания?

Лабораторная работа № 3.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕДИ

Цель работы. Изучить характер зависимости сопротивления металлов от температуры. Измерить температурный коэффициент сопротивления меди.

1 Краткие сведения из теории

Согласно классической электронной теории проводимости металлов, металлический проводник можно рассматривать как физическую систему совокупности двух подсистем: 1) свободных электронов с концентрацией около 10^{28} м^{-3} и 2) положительно заряженных ионов, колеблющихся около положения равновесия. Появление свободных электронов в металле можно объяснить следующим образом. При объединении атомов в металлический кристалл слабее всего связанные с ядром внешние электроны отрываются от атомов. Поэтому в узлах кристаллической решётки металла располагаются положительные ионы, а в пространстве между ними движутся электроны, не связанные с ядрами своих атомов. Эти электроны называют свободными или **электронами проводимости**. Они совершают хаотическое движение, подобное движению молекул газа. Поэтому совокупность свободных электронов в металлах называют **электронным газом**.

Если к проводнику приложено внешнее электрическое поле, то на беспорядочное хаотичное движение свободных электронов накладывается направленное движение под действием сил электрического поля, что и порождает электрический ток. Электроны под влиянием постоянной силы, действующей со стороны электрического поля, приобретают определенную скорость упорядоченного движения (ее называют дрейфовой). Эта скорость не увеличивается в дальнейшем, так как при столкновении с ионами кристаллической решетки электроны передают часть кинетической энергии, приобретенной в электрическом поле, кристаллической решетке. Равновесие (равенство поступления энергии от источника и передачи ее во внутреннюю энергию) наступает при определенной силе тока, которая тем меньше, чем интенсивнее идет передача, т. е. чем неоднороднее вещество (за счет примесей или флуктуаций плотности при колебаниях). Поэтому говорят, что проводник "противодействует" электрическому току. Параметр, характеризующий это противодействие, называется **электрическим сопротивлением** (или просто сопротивлением).

Электрическое сопротивление – физическая скалярная величина, характеризующая свойство проводника уменьшать скорость упорядоченного движения свободных носителей зарядов в проводнике.

Для точного определения величины сопротивления используют закон Ома для однородного (в смысле отсутствия сторонних сил) проводника, который заключается в том, что напряжение между концами проводника (под которым в этом случае понимается разность потенциалов между его концами) U пропорционально силе протекающего по нему тока J :

$$U = RJ. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности R и называется сопротивлением. Это скалярная величина, равная отношению напряжения к силе тока. Единицей сопротивления служит 1 Ом, равный сопротивлению такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет ток силой 1 А. В электротехнике часто используют величину, обратную сопротивлению, которую называют проводимостью. Ее единицей в СИ служит 1 См (сименс).

В общем случае сопротивление зависит от материала проводника, его размеров и формы. Для однородного по составу проводника дли-

ной l при постоянной площади поперечного сечения S $R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ – удельное сопротивление, характеризующее материал. В электротехнике и теоретических работах по физике часто вместо ρ вводят удельную проводимость: $\sigma = \frac{1}{\rho}$. Единицей удельного сопротивления служит 1 Ом·м. Единицей удельной проводимости служит 1 См/м.

Удельное сопротивление зависит от температуры T (за исключением температур, близких к абсолютному нулю, когда тепловые колебания не влияют на величину сопротивления и оно полностью определяется кристаллической структурой). Для многих металлов при температурах, близких к комнатной, ρ изменяется с ростом T по линейному закону. В большинстве случаев зависимость $\rho(T)$ характеризуется кривой 1 (рисунок 1).

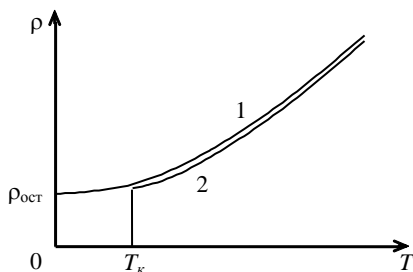


Рисунок 1

Величина остаточного удельного сопротивления $\rho_{\text{ост}}$ в сильной степени зависит от чистоты материала и наличия остаточных механических напряжений в образце. Теоретически у абсолютно чистого материала с идеально правильной кристаллической решеткой при абсолютном нуле температуры $\rho = 0$. У некоторых металлов и сплавов при очень низких температурах (порядка нескольких кельвинов) сопротивление скачком обращается в нуль (см. кривую 2 на рисунке 1). Впервые это явление, названное **сверхпроводимостью**, было обнаружено в 1911 г. Камерлинг-Оннесом для ртути. В дальнейшем сверхпроводимость была обнаружена у свинца, олова, цинка, алюминия и других металлов, а также у ряда сплавов.

Для каждого сверхпроводника имеется своя критическая температура T_k , при которой он переходит в сверхпроводящее состояние. В последнее время для ряда материалов (керамики на основе окислов некоторых металлов) открыто явление **высокотемпературной сверхпроводимости**, которое состоит в переходе в сверхпроводящее состояние при критической температуре, существенно большей, чем

у металлов и сплавов (~ 100 К). Все эти закономерности не могут быть правильно поняты и количественно предсказаны в рамках классической физики, т. к. поведение электронов носит принципиально коллективный характер и требует для адекватного описания квантовых представлений.

Опыт показывает, что при не слишком высоких и не слишком низких температурах зависимость сопротивления металлического проводника $R(t)$ от температуры t можно считать линейной:

$$R(t) = R_0(1 + \alpha t), \quad (2)$$

где R_0 – сопротивление проводника при 0 °С; α – температурный коэффициент сопротивления материала проводника.

Температурный коэффициент сопротивления вещества характеризует зависимость изменения сопротивления при нагревании от рода вещества. Он численно равен относительному изменению сопротивления проводника при нагревании на 1 К. В действительности величина α зависит от температуры. Но для чистых металлов эта зависимость незначительна, поэтому в небольших интервалах температур (несколько десятков градусов) ее можно считать постоянной величиной.

Зависимость сопротивления металлов от температуры используют в термометрах сопротивления. Обычно в качестве термометрического тела такого термометра берут платиновую проволоку, зависимость сопротивления которой от температуры достаточно изучена. Об изменениях температуры судят по изменению сопротивления проволоки, которое можно измерить. Такие термометры позволяют измерять очень низкие и очень высокие температуры, когда обычные жидкостные термометры непригодны.

Измерив сопротивления проводника R_1 и R_2 при температурах t_1 и t_2 , можно найти значение α . Действительно, из уравнений

$$R_1 = R_0(1 + \alpha t_1);$$

$$R_2 = R_0(1 + \alpha t_2)$$

следует, что

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}. \quad (3)$$

2 Оборудование и приборы

Исследуемый проводник помещается в термостат. Температура изменяется с помощью нагревателя и регистрируется с помощью термометра. Для равномерного нагрева не рекомендуется быстрый нагрев проводника. Сопротивление проводника измеряется омметром. Возможно определение сопротивления по закону Ома по измененным значениям силы тока и напряжения.

3 Порядок выполнения работы

- 1 Соединить измеряемый металлический проводник с омметром.
- 2 Омметр установить на предел 100 Ом.
- 3 Включить нагреватель.
- 4 В интервале температур 20–90 °С через каждые 5 °С измерить сопротивление проводника. Измерения провести как при его нагревании, так и при охлаждении. При охлаждении проводника нагреватель выключить.
- 5 Построить график зависимости $R_t = f(t)$; убедиться в его линейности.
- 6 По графику найти сопротивления R_1 и R_2 при температурах t_1 и t_2 (для уменьшения погрешности интервал температур следует выбирать возможно большим).
- 7 По формуле (3) определить значение α .
- 8 Сравнить полученные результаты с табличными.

Контрольные вопросы

- 1 Каков механизм электропроводности металлов?
- 2 Как и почему изменяется сопротивление металлов при изменении температуры?
- 3 Как сопротивление металлов зависит от температуры? Что такое сверхпроводимость?
- 4 В чем заключается явление высокотемпературной сверхпроводимости?
- 5 Каков физический смысл температурного коэффициента сопротивления материала? От чего он зависит?
- 6 Как можно измерить коэффициент α ?
- 7 Получить соотношение (3).

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цель работы. Изучить устройство и работу моста Уитстона, измерить сопротивления резисторов при их параллельном и последовательном соединениях.

1 Краткие сведения из теории

Электрическое сопротивление материалов обусловлено рассеянием энергии электронов проводимости на дефектах кристаллической решетки. В результате рассеяния электроны проводимости отдают решетке добавочную энергию направленного движения, полученную от внешнего электрического поля. Вследствие этого металл нагревается, энергия электрического тока переходит в тепло.

С нагреванием металла усиливаются колебания элементарных ячеек кристаллической решетки, что приводит к увеличению рассеяния электронов. Происходит нарушение их направленного движения, и сопротивление увеличивается.

Все эти факторы и обуславливают электрическое сопротивление металлов и их увеличение с ростом температуры.

Для измерения сопротивлений проводников постоянному электрическому току применяется мост Уитстона, который представляет собой замкнутую электрическую цепь, состоящую из четырех последовательно соединенных сопротивлений в виде прямоугольника, в одну из диагоналей которого включен источник постоянного тока, а в другую – чувствительный гальванометр (рисунки 1, 2).

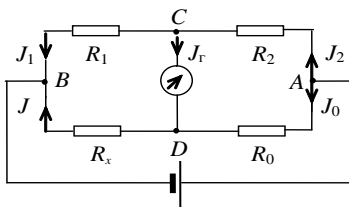


Рисунок 1

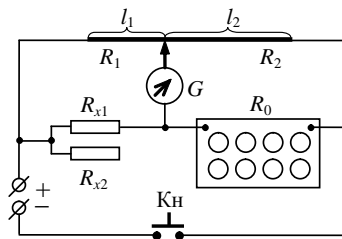


Рисунок 2

Мост Уитстона позволяет сравнивать неизвестное сопротивление с известным. В качестве сопротивлений используют реохорд, который представляет собой укрепленную на линейке однородную проволоку, вдоль которой может перемещаться скользящий контакт.

При произвольно выбранных сопротивлениях через гальванометр течет ток. Однако можно подобрать сопротивления R_1 и R_2 так, чтобы при заданных сопротивлениях R и R_0 ток в цепи гальванометра отсутствовал. Такое состояние называется равновесием моста.

Выведем условия равновесия моста, пользуясь законами Кирхгофа, сущность которых состоит в следующем.

1 Алгебраическая сумма токов в любом узле равна нулю

$$\sum_{i=1}^n J_i = 0, \quad (1)$$

где n – число проводников, сходящихся к рассматриваемому узлу; i – номер проводника; J_i – сила тока в этом проводнике (алгебраическое значение).

2 Для любого замкнутого контура разветвленной электрической цепи алгебраическая сумма произведений сил тока на сопротивления соответствующих участков, т. е. сумма падений напряжения, равна алгебраической сумме электродвижущих сил, действующих в этом контуре,

$$\sum_{i=1}^n J_i R_i = \sum_{j=1}^m \mathcal{E}_j. \quad (2)$$

Здесь n – число участков замкнутого контура; i – номер участка; J_i – сила тока на i -м участке; R_i – сопротивление i -го участка; m – число элементов с ЭДС в контуре; j – номер элемента; \mathcal{E}_j – ЭДС j -го элемента.

Нужно иметь в виду, что знаки сил токов в (1) зависят от того, входят они в узел или выходят из него (по соглашению). Для корректной записи уравнения (2) необходимо сначала выбрать направление обхода соответствующего замкнутого контура.

Для анализа цепи на рисунке 1 рассмотрим узлы C и D . Согласно первому правилу Кирхгофа можно записать

$$J_2 - J_{\Gamma} - J_1 = 0; \quad J_0 + J_{\Gamma} - J = 0. \quad (3)$$

Согласно второму правилу Кирхгофа запишем для контура $ADCA$

$$J_0 R_0 - J_{\Gamma} R_{\Gamma} - J_2 R_2 = 0 \quad (4)$$

и для контура $DBCD$

$$J R_x - J_1 R_1 + J_{\Gamma} R_{\Gamma} = 0. \quad (5)$$

где J_{Γ} и R_{Γ} – соответственно сила тока и сопротивление для гальванометра.

При равновесии моста ток в цепи гальванометра отсутствует, т. е. $J_{\Gamma} = 0$.

Подставляя в (3), получим $J_2 = J_1$ и $J_0 = J$. Тогда из (4) и (5) следует

$$J_0 R_0 = J_2 R_2; \quad J R_x = J_1 R_1.$$

Разделив второе уравнение на первое, получим уравнение равновесия моста в виде

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (6)$$

С помощью сопротивлений R_1 и R_2 можно добиться равновесия моста для любого неизвестного сопротивления R_x , которое затем определяется из соотношения (7)

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2}. \quad (7)$$

Сопротивлениями R_1 и R_2 служат отрезки реохорда, расположенные по обе стороны от движка. Из формулы $R = \rho \frac{l}{S}$ видно, что при постоянстве удельного сопротивления ρ и площади поперечного сечения проводника S сопротивление пропорционально длине проводника l , поэтому отношение сопротивлений плечей реохорда AD и DB можно заменить отношением длин плечей, т. е. $\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}$.

Выражение (7) принимает вид

$$R_x = R_0 \frac{l_1}{l_2}. \quad (8)$$

Остается перемещением движка реохорда установить гальванометр на нуль, отсчитать длины плечей реохорда и вычислить по формуле (8) искомое сопротивление.

2 Оборудование и приборы

1 Мост Уитстона (см. рисунок 1). Собирается на занятии из отдельных элементов: магазина сопротивлений, реохорда, источника постоянного тока, ключа, гальванометра.

3 Порядок выполнения работы

1 Собрать электрическую цепь (см. рисунок 2). Источник тока подключить в последнюю очередь при разомкнутом ключе. Дать установке прогреться в течение одной минуты.

2 Получить указание преподавателя, для каких и скольких положений движка реохорда производить все последующие измерения (преподаватель указывает длины плеч реохорда l_1 и l_2 на лабораторной установке).

3 Для случая, когда в диагональ моста включено сопротивление R_{x1} (как показано на рисунке 2), поставить движок реохорда в одно из заданных положений и, замыкая ключ на некоторое время, подобрать сопротивление магазина R таким, чтобы стрелка гальванометра оказалась около нуля.

4 Записать величину сопротивления магазина R и длины плеч реохорда l_1 и l_2 в таблицу 1. Рассчитать значение неизвестного сопротивления по формуле (8). Прodelать подобные измерения для всех заданных положений реохорда.

5 Повторить пп. 3 и 4 еще три раза (соответственно для случая подключения в диагональ моста сопротивления R_{x2} ; последовательно соединенных сопротивлений R_{x1} и R_{x2} ; параллельно соединенных этих же сопротивлений). Все данные и результаты расчетов занести в соответствующие разделы таблицы 1.

6 Выключить установку в порядке, обратном изложенному в п. 1.

Таблица 1

№ п/п	l_1 , м	l_2 , м	R , Ом	R_x , Ом	$\langle R_x \rangle$, Ом	ΔR_x , Ом
Измеряется сопротивление R_{x1}						
Измеряется сопротивление R_{x2}						
Измеряется сопротивление батареи последовательно соединенных R_{x1} и R_{x2}						
Измеряется сопротивление батареи параллельно соединенных R_{x1} и R_{x2}						

7 Для каждого из четырех случаев определить среднее значение сопротивления $\langle R \rangle$, погрешности отдельных измерений ΔR , а также среднеквадратичную погрешность S и полуширину доверительного интервала Δ для доверительной вероятности $P = 0,95$ по формулам, которые приведены на плакате в лаборатории.

Результат в каждом из четырех случаев представить в виде

$$R = \langle R \rangle \pm \Delta \quad \text{при} \quad P = 0,95.$$

8 Рассчитать теоретическое значение сопротивлений батареи из двух резисторов при их последовательном и параллельном соединениях по формулам:

$$R_{\text{посл}} = R_{x1} + R_{x2}, \quad R_{\text{парал}} = \frac{R_{x1} R_{x2}}{R_{x1} + R_{x2}}, \quad (9)$$

используя измеренные значения R_{x1} и R_{x2} (соответствующие средние величины). Результаты представить в виде таблицы 2. После анализа полученных результатов сделать вывод о точности измерений.

Таблица 2

Соединение сопротивлений	$\langle R \rangle$	Δ	Расчетное значение сопротивления
	Ом		
Последовательное			
Параллельное			

Контрольные вопросы

- 1 Что такое сопротивление и в чем состоит причина его появления? В каких единицах оно измеряется?
- 2 Как сопротивление металлов зависит от температуры? Что такое сверхпроводимость?
- 3 Сравните различные методы определения электрических сопротивлений.
- 4 Сформулируйте правила Кирхгофа и объясните порядок их применения.
- 5 Рассмотрите работу моста Уитстона и выведите формулу (6).
- 6 Какие бывают соединения сопротивлений? Выведите соотношения (9) для их последовательного и параллельного соединений (см. описание лабораторной работы 3.5).

Список литературы

- 1 **Савельев, И. В.** Курс общей физики : учеб. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1988. – 496 с.
- 2 **Детлаф, А. А.** Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высш. шк., 1989. – 421 с.
- 3 **Трофимова, Т. И.** Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 14-е изд., стереотип. – М. : Изд. центр «Академия», 2007. – 560 с.
- 4 **Атамаян, Э. Г.** Приборы и методы измерения электрических величин / Э. Г. Атамаян. – М. : Высш. шк., 1982. – 264 с.
- 5 **ГОСТ 22261–82.** Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1982.
- 6 **ГОСТ 5365–83.** Приборы электроизмерительные. Циферблаты и шкалы. Общие технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1983.
- 7 **ГОСТ 8711–78.** Амперметры и вольтметры. Общие технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1978.

СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания по выполнению лабораторных работ	3
<i>Лабораторная работа № 3.1</i> Определение электрической постоянной с помощью абсолютного вольтметра.....	4
<i>Лабораторная работа № 3.2</i> Определение диэлектрической проницаемости вещества.....	11
<i>Лабораторная работа № 3.3</i> Измерение емкости конденсатора с помощью баллистического гальванометра	17
<i>Лабораторная работа № 3.4</i> Измерение емкости конденсаторов с помощью моста переменного тока	24
<i>Лабораторная работа № 3.5</i> Измерение электрических сопротивлений мостовым методом	31
<i>Лабораторная работа № 3.6</i> Расширение диапазонов измерений у амперметра и вольтметра	39
<i>Лабораторная работа № 3.7</i> Изучение работы источника постоянного тока.....	46
<i>Лабораторная работа № 3.8</i> Изучение энергетических соотношений в цепи постоянного тока.....	53
<i>Лабораторная работа № 3.9</i> Определение температурного коэффициента сопротивления меди.....	59
<i>Лабораторная работа № 3.10</i> Измерение электрических сопротивлений.....	64
Список литературы.....	69

Учебное издание

*БУЙ Михаил Владимирович
ЛИПСКАЯ Людмила Михайловна
ПАВЛЕНКО Александр Петрович
ПИНЧУК Ростислав Григорьевич*

ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Лабораторный практикум по курсу "Физика"

Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Корректор *Т. А. Пузач*

Подписано в печать 04.08.2017 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура "Таймс". Печать офсетная.
Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 3,42. Тираж 1000 экз.
Зак. № . Изд. № 41.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель