

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ  
ПОЛИМЕРОВ»**

---

**Кафедра физики**

**Ф И З И К А**

**ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

**Учебно-методическое пособие**

**к лабораторным работам № 2 – 01, 2 – 11, 2-21**

**для бакалавров всех факультетов**

**Санкт-Петербург  
2013**

УДК 537(072)

Физика. Электромагнетизм: Учебно-методическое пособие к лабораторным работам № 2-01, 2-11, 2-21 для бакалавров всех факультетов / сост. В.М.Максимов, В.О.Кабанов, В.К.Козырев, С.А.Поржецкий, А.А.Ашкалуни; под ред. проф. П.М.Валова. СПбГТУРП .-СПб., 2013. -36 с.

Учебно-методическое пособие содержит описание трех лабораторных работ по электричеству с кратким описанием теории по каждой работе. Предназначается для бакалавров всех специальностей.

Рецензент: доцент кафедры физики СПбГТУРП, канд. физ.-мат. наук Полянский М. Н.

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой физики Санкт-Петербургского технологического университета растительных полимеров (протокол № 6 от 14.03.2013 г.).

Рекомендовано к изданию методической комиссией факультета промышленной энергетики СПбГТУРП (протокол № 7 от 14.03.2013 г.).

© Санкт-Петербургский государственный  
технологический университет  
растительных полимеров, 2013

## ТЕМА 2-0. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Электрическим током* называется направленное движение электрических зарядов. *Сила тока* равна заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени

$$I = \frac{q}{t} \quad (1)$$

Единицей тока служит *ампер* [А] - основная электрическая единица в системе СИ. Заряд, перенесенный током 1 А за одну секунду, называется *кулоном*. На практике употребляют и более мелкие единицы: 1 миллиампер (мА) =  $10^{-3}$  А и 1 микроампер (мкА) =  $10^{-6}$  А. Направление тока совпадает с направлением движения положительно заряженных частиц. В любом проводнике имеются свободные заряженные частицы – носители тока. В отсутствие электрического поля они движутся хаотически. Если создать внутри проводника электрическое поле, то на них будет действовать сила  $F=qE$ , где  $E$  напряженность электрического поля. Между концами проводника в этом случае создается разность потенциалов  $U$ , называемая *напряжением*. Под действием этих сил заряды приобретают направленное движение, и возникает ток, сила которого зависит от приложенного напряжения. Эта зависимость называется *вольт-амперной характеристикой* проводника. Для многих проводников эта зависимость особенно проста и носит название закона Ома для участка цепи.

*Закон Ома*. Ток в проводнике пропорционален приложенному к нему напряжению.

$$I = G \cdot U = \frac{U}{R} \quad (2)$$

$G$  называется *проводимостью* проводника, а величина, обратная проводимости - *сопротивлением* проводника  $R$ .

Проводимость и сопротивление зависят от формы, геометрических размеров и материала проводника. Сопротивление провода пропорционально его длине  $l$  и обратно пропорционально площади поперечного сечения  $S$ :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

(3)

где  $\rho$  - удельное сопротивление материала проводника. Обратная величина  $\lambda = 1/\rho$  называется удельной проводимостью.

Удельное сопротивление металлов и сопротивление металлических проводников линейно зависят от температуры:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad , \quad R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$$

(4)

где  $\rho_0$  и  $R_0$  - удельное сопротивление и сопротивление металлического проводника при температуре  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления.

Из закона Ома можно установить размерность сопротивления  $[R] = [U/I] = \text{В/А} = \text{Ом}$ . 1 Ом - это сопротивление такого проводника, в котором идет ток 1 ампер при напряжении 1 вольт.

Подставим в закон Ома (2) выражение сопротивления (3) и по-

лучим 
$$I = \frac{U \cdot S}{\rho \cdot l}$$

или

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{l}$$

(5)

Величина  $j = I/S$  называется плотностью тока,  $E = U/l$  - это напряженность электрического поля в проводнике. Формула (5) примет вид

$$j = \frac{E}{\rho} = \lambda E$$

(6)

Это закон Ома в дифференциальной форме: *плотность тока прямо пропорциональна напряженности электрического поля*. Он связывает между собой локальные характеристики проводника, электрического поля и электрического тока. Плотность тока является вектором указывающим направление тока, и (6) можно записать

$$\vec{j} = \lambda \vec{E}$$

*Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца.*

В проводнике носители тока движутся под действием электрического поля, при этом поле совершает работу  $A = q \cdot U$ , где  $q = I \cdot t$ , откуда получим

$$A = I \cdot U \cdot t \quad (7)$$

При этом электрическая энергия превращается в другие формы: внутреннюю энергию при выделении тепла, химическую при электролизе, механическую в электродвигателе и громкоговорителе, световую в люминесцентных лампах. При прохождении электрического тока через обычный проводник всегда выделяется количество тепла  $Q = I^2 \cdot R \cdot t$ . Этот закон называется *законом Джоуля-Ленца*. В общем случае  $Q$  не равно  $A$ . Например, для электродвигателя закон Джоуля-Ленца дает количество тепла выделяющегося в обмотке, а формула (7) дает полную работу тока, включая механическую. Мощность тока, т.е. работа, совершаемая за единицу времени

$$P = I \cdot U \quad (8)$$

*Соединение проводников.* При последовательном соединении проводники включены один за другим (рис.1), при этом токи, проходящие через все проводники, одинаковы. Полное напряжение  $U = U_1 + U_2 + U_3$ , следовательно

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (9)$$

При последовательном соединении полное сопротивление равно сумме отдельных сопротивлений. Напряжения на сопротивлениях при этом пропорциональны величинам этих сопротивлений.

При параллельном соединении (рис.2) полный ток разветвляется по всем сопротивлениям, при этом  $I = I_1 + I_2 + I_3$ . Напряжение на всех проводниках одинаково. По закону Ома

$$\frac{1}{R} = \frac{I}{U} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{U} = \frac{I_1}{U_1} + \frac{I_2}{U_2} + \frac{I_3}{U_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (10)$$

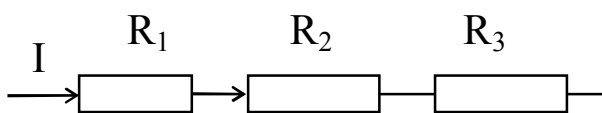


Рис.1

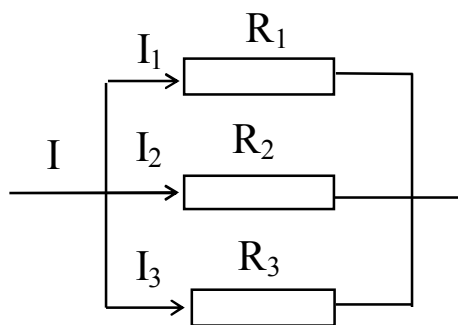


Рис.2

**Полная - замкнутая электрическая цепь.** В обычных проводниках заряды двигаются под действием сил электростатического поля. Но в замкнутой цепи заряды не могут двигаться в одном направлении под действием только электростатических сил, так как в электростатическом поле нет замкнутых силовых линий. Поэтому на каком-то участке замкнутой цепи заряды должны двигаться против сил электростатического поля, т.е. в цепи должны действовать не электростатические силы. Эти силы называются *сторонними*. Сторонние силы разделяют заряды разных знаков. Они могут иметь разную природу: химические силы, электромагнитные силы и т.д. Участок цепи, в котором действуют сторонние силы, разделяющие заряды разных знаков, называется *источником тока*. Таким образом, полная (замкнутая) цепь состоит из источника тока и подключенных к нему проводников.

Источник тока - это внутренний участок цепи, а все, что подключено к нему это внешняя цепь. Во внешней цепи заряды двигаются под действием электростатических сил, а внутри источника под действием сторонних сил - против электростатических. В источнике электрического тока происходит превращение энергии неэлектрического происхождения (механической, химической, световой) в электрическую энергию.

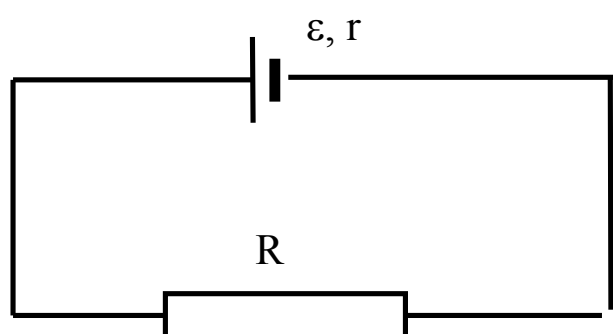


Рис.3

*Электродвижущая сила (ЭДС) источника это работа, совершаемая сторонними силами при разделении единицы электрического заряда*

$$\varepsilon = A/q \quad (11)$$

Поскольку Дж/Кл = вольт, то ЭДС измеряется в вольтах. Любой источник тока характеризуется ЭДС и как любой другой

проводник сопротивлением  $r$ , которое называется внутренним сопротивлением цепи. Все подключенные к источнику проводники образуют внешнюю цепь и могут рассматриваться как один проводник с общим сопротивлением  $R$  (рис. 3). *Закон Ома для полной цепи. Сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи, которое равно сумме внешнего сопротивления и сопротивления источника.*

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad \cdot R \text{ — называют падением на-}$$

пряжения во внешней цепи, а  $I \cdot r$  — падением напряжения во внутренней цепи. Тогда закон Ома для полной цепи можно записать

так: сумма падений напряжений во внешней и внутренней цепи равна ЭДС источника.

$$I \cdot R + I \cdot r = \mathcal{E} \quad (13)$$

Режимы работы источника. Для данного источника ЭДС и его внутреннее сопротивление можно считать постоянными. Ток в цепи, полная мощность и мощность во внешней цепи определяются внешним сопротивлением  $R$ , которое может изменяться от 0 до  $\infty$ .  $R = \infty$  соответствует разомкнутой цепи, а  $R = 0$  ( $R \ll r$ ) - короткому замыканию. При коротком замыкании ток достигает максимального для данного источника значения

$$I_m = \mathcal{E} / r. \quad (14)$$

Полная работа в цепи - это работа источника тока  $A_{\mathcal{E}} = q \cdot \mathcal{E} = I \cdot \mathcal{E} \cdot t$ .

Полезная работа - это работа во внешней цепи  $A = I \cdot U \cdot t$ . Соответственно полная и полезная мощность равны  $P_{\mathcal{E}} = I \cdot \mathcal{E}$  и  $P = I \cdot U$ . Рассмотрим зависимость напряжения на зажимах источника от силы тока в цепи. Напряжение на зажимах источника равно напряжению на внешней цепи  $U = I \cdot R$ . Эта формула неудобна для анализа зависимости напряжения от тока, так как ток может изменяться только при изменении сопротивления внешней цепи. Так, например,  $I = 0$  при  $R = \infty$  и их произведение не определено. Используя закон Ома для полной цепи (13), получим  $U + Ir = \mathcal{E}$ . Следовательно

$$U = \mathcal{E} - I \cdot r \quad (15)$$

Отсюда видно, что напряжение на зажимах источника линейно убывает при возрастании силы тока от значения, равного ЭДС при разомкнутой цепи до нуля при коротком замыкании (рис.4). Это позволяет весьма просто определять ЭДС источника, измеряя напряжение на его зажимах с помощью вольтметра при разомкнутой цепи. Погрешность измерения тем меньше, чем больше сопротивление вольтметра.



Для полезной мощности получим

$$P = \mathcal{E} \cdot I - I^2 \cdot r \quad (16)$$

Это уравнение выражает параболическую зависимость полезной мощности от силы тока (рис.5). При некотором значении тока полезная мощность достигает максимального значения. Для нахождения максимума функции надо найти производную  $P$  по  $I$  и приравнять ее нулю. Из полученного выражения можно определить значение тока, при котором достигается максимальное значение полезной мощности. Из (16) имеем

$$\frac{dP}{dI} = \mathcal{E} - 2 \cdot I \cdot r = 0 \quad , \quad \text{т. е.}$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{2r} \quad (17)$$

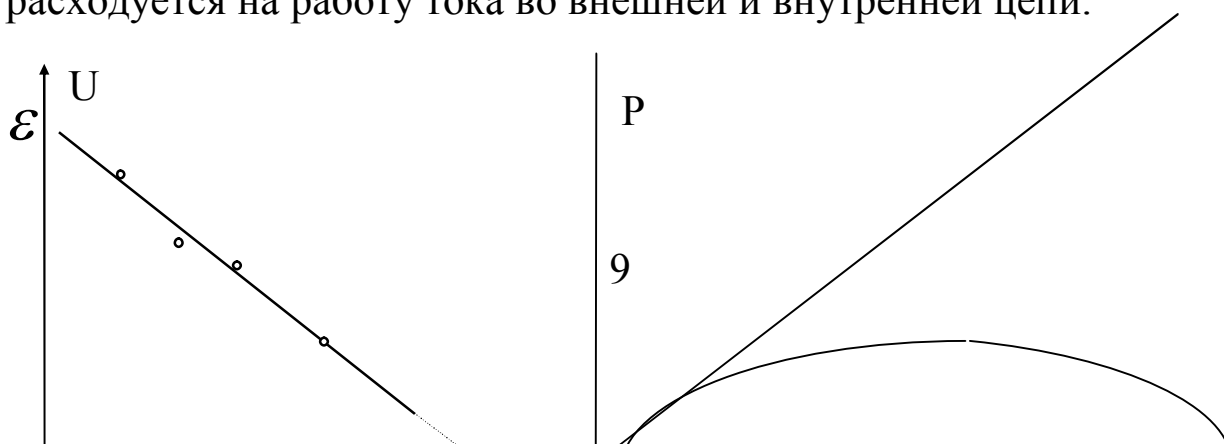
Сопоставляя (17) и (12), получим, что *максимум полезной мощности достигается, если  $R = r$ , то есть если внешнее сопротивление равно внутреннему сопротивлению источника.*

Определим значение коэффициента полезного действия источника тока. КПД источника тока называется отношение полезной мощности источника к его полной мощности

$$\eta = \frac{P}{P_{\mathcal{E}}} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R + r}$$

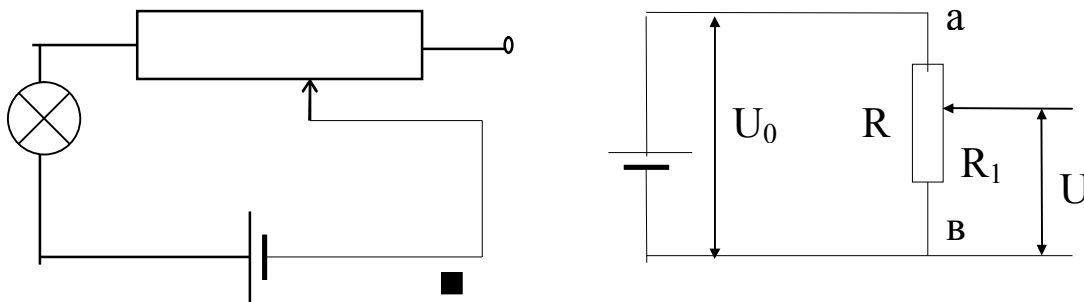
Это выражение показывает, что с увеличением тока КПД падает, причем графически эта зависимость выражается прямой линией. Из (18) следует, что КПД равен 50 %, когда полезная мощность достигает максимального значения. Умножая (13) на  $I \cdot t$  получим

$\mathcal{E} \cdot I \cdot t = I \cdot U \cdot t + I^2 \cdot r \cdot t$ , т.е.  $A_{\mathcal{E}} = A + I^2 r \cdot t$ . Это уравнение выражает закон сохранения энергии: работа сторонних сил в источнике тока расходуется на работу тока во внешней и внутренней цепи.



$$I_m$$

*Приборы.* Для регулировки тока в электрической цепи используется переменное сопротивление - *реостат* (рис.6). Лабораторный реостат состоит из обмотки тонкой проволоки из сплава с высоким удельным сопротивлением (нихром, никелин), намотанной на жаростойкий изолирующий цилиндр, и скользящего по ней контакта. Скользящий контакт передвигается по медному стержню, на концах которого имеются клеммы.



используется (рис.6) в электрических цепях для регулировки напряжения в качестве делителя напряжения - *потенциометра*. В этом случае он включается в цепь по схеме на рис.7. Напряжение  $U_0$  подключается к концам обмотки. Напряжение  $U$ , снимаемое с движка реостата и одного из концов, равно  $U = U_0 \cdot R / R_m$ , где  $R_m$  - полное сопротивление реостата,  $R$  - сопротивление между концом реостата и скользящим контактом. Если скользящий контакт находится в верхней точке реостата, то  $U = U_0$ , если в нижней - то  $U = 0$ . При промежуточном положении контакта можно получить любое напряжение от 0 до  $U_0$ .

*Амперметр* служит для измерения силы тока. Он включается в цепь последовательно, так как весь измеряемый ток должен про-

текать через прибор. Чтобы включение амперметра не изменяло ток в цепи, его сопротивление должно быть значительно меньше

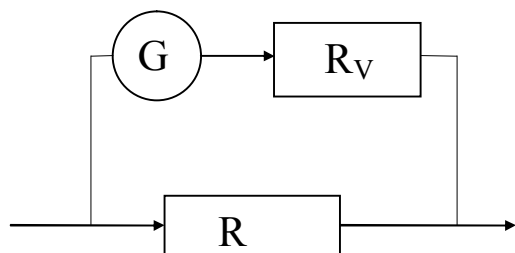


Рис.8

сопротивления элементов цепи.

*Вольтметр* служит для измерения напряжения. Он представляет собой гальванометр, последовательно с которым включено большое сопротивление  $R_V$ . При подключении вольтметра к каким-либо точкам цепи (рис. 8) в вольтметр

ответвляется часть тока. Этот ток по закону Ома пропорционален напряжению между этими точками. Отклонение стрелки гальванометра пропорционально току и, следовательно, напряжению, значения которого непосредственно наносят на шкалу прибора. Чтобы при включении вольтметра существенно не менялся ток и напряжения в цепи, сопротивление вольтметра должно быть велико по сравнению с сопротивлением участка цепи. В некоторых типах вольтметров предусмотрена возможность изменения сопротивления, что приводит к изменению чувствительности прибора. Такие вольтметры имеют несколько пределов измерения.

На электроизмерительных приборах указывается *предел измерения*, т.е. ток или напряжение отклоняющие стрелку до конца шкалы. Зная предел измерения прибора и полное число делений его шкалы легко определить цену деления прибора. Большинство приборов являются многопредельными. Выбор предела производится либо выбором одной из клемм, либо переключателем пределов.

*Погрешности измерительных приборов.* Для электроизмерительных приборов на каждом пределе измерения постоянной является абсолютная погрешность. Класс точности прибора указывает абсолютную погрешность в процентах от предела измерения. Обычно цена наименьшего деления прибора согласована с его классом точности и равна абсолютной погрешности. Таким образом, *систематическая погрешность измерения* может

быть принята равной *цене наименьшего деления прибора* на данном пределе измерения.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-01

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В первой части работы исследуется зависимость силы тока от напряжения для отдельного проводника и проверяется закон Ома для участка цепи. Во второй части работы изучаются зависимости напряжения на зажимах источника, полной и полезной мощности от силы тока в полной цепи.

*Задание № 1. Проверка закона Ома для участка цепи.*

Порядок проведения работы:

1. Собрать схему (рис. 9).
2. Определить цену деления амперметра и вольтметра.
3. Передвигая движок реостата, определить минимальное и максимальное значения напряжения в данной схеме.
4. Исследовать зависимость тока от напряжения на данном участке цепи. Для этого с помощью реостата установить минимальное

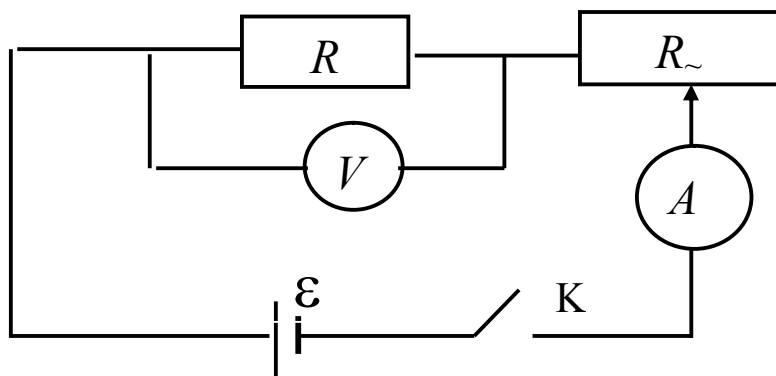


Рис. 9

значение напряжения, снять показания амперметра и записать значения тока и напряжения в таблицу 1. Повторить измерения при 5-7 значениях напряжения в диапазоне от минимального до максимального

значения. По полученным данным построить график зависимости  $I = f(U)$ .

5. Рассчитать сопротивление и его погрешность по значениям тока и напряжения, занесенным в таблицу.

Цена деления вольтметра ---

Цена деления амперметра --- Таблица 1

№	$U$		$I$		$R_i$	$\Delta R_i$	$\Delta R_i^2$	Результат, погрешн.
	дел	В	дел	мА	Ом			
1.								$S_R =$
2.								
3.								$\Delta R =$
...								
Среднее						$S^2 =$		$R =$

Задание №2. Исследование полной электрической цепи.

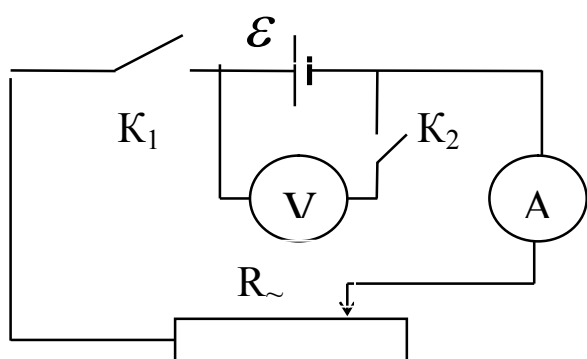


Рис.10

1. Собрать цепь (рис.10).
2. Определить цену деления амперметра и вольтметра.
3. Измерить ЭДС вольтметром. Для этого замкнуть ключ  $K_2$  (не замыкая  $K_1$ ) и записать показания вольтметра.
4. Определить минимальный и максимальный ток.
5. Измерить напряжение на зажимах источника при различных значениях тока. Всего 12-15 измерений, выбирая значения тока более-менее равномерно в диапазоне от минимального до максимального.
6. Вычислить полную и полезную мощность при каждом токе.
7. Построить графики зависимости  $U$ ,  $P_\epsilon$ ,  $P$  от  $I$ . Все три кривые построить на одном графике. Масштабы для напряжения и мощности выбираются независимо. Определить по графикам ЭДС и ток короткого замыкания  $I_m$ . Рассчитать внутреннее со-

противление источника  $r$ . Определить  $P_{\text{макс}}$ . Проверить соотношение  $P_{\text{макс}} = P_{\varepsilon}/2$ .

Цена деления вольтметра ---

Цена деления амперметра ---

Таблица 2

№	$I$		$U$		$\varepsilon =$	
	дел	мА	дел	В	$P_{\varepsilon}$ мВт	$P$ мВт
1.						
2.						
...						

### Контрольные вопросы и задачи

1. В цепи течет постоянный ток силой 0,5 А. Какой заряд он перенесет за 30 секунд?
2. К двум последовательно соединенным сопротивлениям приложено напряжение 10 В. Величина первого сопротивления 5 Ом и напряжение на нем 4 В. Найдите величину второго сопротивления.

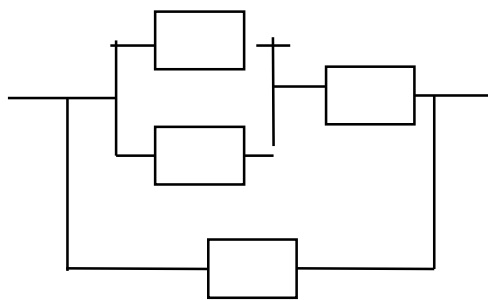


Рис.11.

3. Найти полное сопротивление цепи (рис.11). Все  $R = 20$  Ом.
4. Через два параллельно соединенных сопротивления течет общий ток 5 А. Первое сопротивление 2 Ом, ток через него 3 А. Найдите величину второго сопротивления.
5. ЭДС источника 10 В, внутреннее сопротивление 2 Ом. В каких пределах может меняться ток от этого источника? Какая максимальная полезная мощность может быть получена от него?
6. Максимальный ток источника 4 А. Максимальная полезная мощность источника 10 Вт. Найти ЭДС и его сопротивление.

7. Внутренние сопротивления источника и вольтметра равны 10 Ом и 1000 Ом соответственно. При измерении ЭДС источника вольтметр показал 8,5 В. Каково истинное значение ЭДС?
8. Лампа мощностью 60 Вт рассчитана на напряжение 120 В. Эту лампу включили в сеть напряжением 150 В последовательно с сопротивлением 60 Ом. Найдите мощность, выделяемую на лампе.
9. К электромотору с сопротивлением обмотки якоря 1,5 Ом приложено напряжение 20 В. Найдите механическую мощность электромотора при токе 2 А.
10. Ток в цепи изменяется по закону  $I=0.2+0.03 \cdot t^2$ . Найдите заряд перенесенный током и количество тепла, выделившегося на сопротивлении 5 Ом, за первые 10 сек.
11. Лампа имеет мощность 100 Вт при напряжении 200 В. В каких пределах можно регулировать мощность лампы реостатом с полным сопротивлением 300 Ом.

## ТЕМА 2-1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

*Электрическое поле* - это особый вид материи, передающий взаимодействие между заряженными телами. Электрическое поле создается заряженными телами и оказывает силовое действие на любой заряд, помещенный в поле. Для исследования поля используют небольшое заряженное тело - пробный заряд. Если поместить пробный заряд в некоторую точку поля, то на него будет действовать сила прямо пропорциональная величине заряда. Величина силы зависит также от свойств поля. Силовой характеристикой поля является напряженность электрического поля.

*Напряженность электрического поля*  $\vec{E}$  - это сила действующая на единичный, пробный, положительный заряд, помещенный в данную точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1)$$

Для описания поля в некоторой области необходимо задать напряженность во всех точках этой части пространства. Графически удобно изображать поле с помощью силовых линий. *Силовая линия* - это линия, в каждой точке которой вектор напряженности направлен по касательной к ней. Силовые линии начинаются на положительных зарядах или на бесконечности и заканчиваются на отрицательных зарядах либо уходят на бесконечность. Густота силовых линий пропорциональна величине напряженности поля.

Электрическое поле определяется распределением зарядов, создающих это поле. Для простейших заряженных тел можно вывести формулы описывающие поле создаваемое этими телами. Напряженность поля точечного заряда  $q$  описывается формулой

$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^2}$ , где  $\epsilon_0=8,86 \cdot 10^{-12}$  - электрическая постоянная, а  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды. Эта же формула описывает поле вне заряженной сферы. Внутри сферы напряженность равна нулю.

Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости однородно, т.е. напряженность одинакова во всех точках поля (с каждой стороны плоскости). Силовые линии однородного поля -

параллельные прямые.  $E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}$ , где  $\sigma = q / S$  поверхностная плотность заряда.

Если имеется несколько заряженных тел то напряженность поля можно найти по принципу суперпозиции: *напряженность поля, создаваемого несколькими заряженными телами, равна векторной сумме напряженностей, создаваемых каждым телом в отдельности.*

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \quad (2)$$



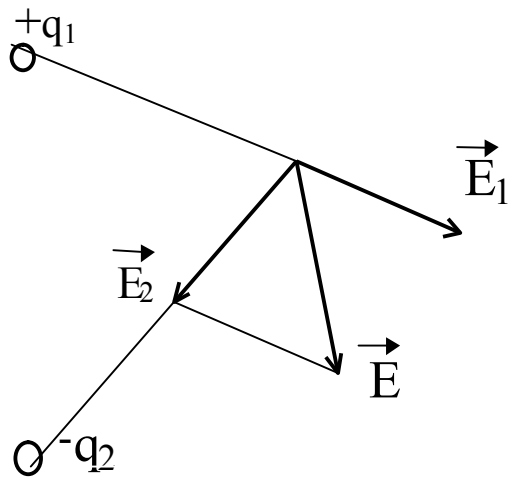


Рис. 1

Все напряженности берутся в одной и той же точке пространства. В качестве тел могут выступать и части одного тела. На рис. 1 показано применение принципа суперпозиции для двух точечных зарядов.

Так как на любой заряд, помещенный в электрическое поле, действует сила, то при перемещении этого заряда электрическое поле совершает работу.

*Потенциал* - это работа, совершаемая электрическим полем при перемещении единичного, пробного, положительного заряда из данной точки на бесконечность,

$$\varphi = \frac{A_{1\infty}}{q^*} .$$

Так как работа поля пропорциональна величине пробного заряда, то потенциал не зависит от величины пробного заряда, а зависит только от свойств самого поля, т.е. от величин и положения зарядов, создающих электрическое поле. Знание распределения потенциала позволяет находить работу перемещения заряда из любой точки в другую. Для точечного заряда эта работа равна

$A_{12} = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$ , где  $\varphi_1, \varphi_2$  потенциалы начальной и конечной точки. Разность потенциалов называется также *напряжением*. Работа перемещения заряда в электрическом поле не зависит от формы пути, а зависит только от начальной и конечной точки, т.е. электростатическое поле является потенциальным и существует потенциальная энергия заряда в электрическом поле.

*Потенциальная энергия* точечного заряда в электрическом поле равна  $W_p = q \cdot \varphi$ . При движении заряда в электрическом поле полная энергия, равная сумме потенциальной и кинетической энергии, сохраняется. Потенциал зависит от точки поля, т.е. является функцией пространственных координат. Для простей-

ших заряженных тел выведены формулы, описывающие эту зависимость. Так потенциал точечного заряда описывается формулой

$$\varphi = \frac{q}{4 \pi \varepsilon \varepsilon_0 r} \quad (3)$$

Для потенциала также выполняется *принцип суперпозиции*: потенциал поля создаваемого системой зарядов равен алгебраической сумме потенциалов создаваемых каждым зарядом в отдельности. Для графического изображения поля удобно использовать эквипотенциальные поверхности. *Эквипотенциальная поверхность* это поверхность, в каждой точке которой потенциал имеет одно и то же значение. Обычно проводят эквипотенциальные поверхности через равные интервалы значений потенциала.

*Связь между напряженностью поля и потенциалом.* Для описания электрического поля достаточно знать либо напряженность, либо потенциал во всех точках поля. Если известно распределение напряженности поля, то можно найти распределение потенциала и, наоборот, по распределению потенциала можно найти распределение напряженности поля.

Связь между напряженностью и потенциалом следует из соотношения между силой и работой в механике:

$$A_{12} = \int_{(1)}^{(2)} F_l dl, \quad \text{где } F_l \text{ - проекция силы на направление ка-}$$

сательной к траектории перемещения заряда. Интеграл берется вдоль траектории от начальной точки (1) до конечной точки (2). Выразим работу через разность потенциалов, а силу через напря-

женность:  $A_{12} = q * (\varphi_1 - \varphi_2)$ ,  $F_l = q * E_l$ . Отсюда следует, что разность потенциалов между любыми точками по-

$$\text{ля: } \varphi_1 - \varphi_2 = \int_{(1)}^{(2)} E_l dl. \quad \text{Так как работа электрического}$$

поля не зависит от формы пути, то интеграл можно брать по любой траектории, соединяющей точки (1) и (2). Устремляя точку (2) на бесконечность и полагая потенциал на бесконечности равным нулю, получим

$$\varphi_1 = \int_{(1)}^{\infty} E_l dl \quad (4)$$

Эта формула называется *соотношением между потенциалом и напряженностью в интегральной форме*. Она удобна для вычисления потенциала по известному распределению напряженности поля. Наоборот, если известно распределение

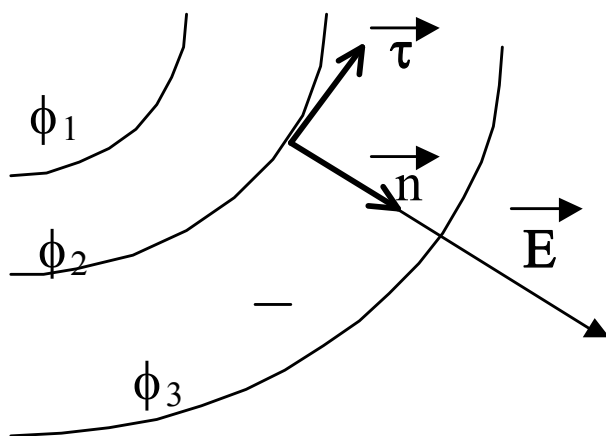


Рис. 2.

потенциала, то можно найти напряженность поля в любой точке. Возьмем малый (элементарный) отрезок пути  $dl$ , тогда работа электрического поля при переносе заряда на отрезке равна:

$$dA = F_l dl = q * E_l dl = q * (\varphi_1 - \varphi_2) = -q * d\varphi$$

, Отсюда  $E_l dl = -d\varphi$ , и, следовательно,

$$E_l = - \frac{\partial \varphi}{\partial l}$$

Таким образом, проекция напряженности на любое направление равна уменьшению потенциала на единицу длины в этом направлении.

Покажем, что вектор напряженности всегда перпендикулярен к эквипотенциальной поверхности. Возьмем  $dl$  в направлении касательной  $\vec{\tau}$  к этой поверхности (рис. 2), тогда  $d\varphi = 0$ , так как потенциал вдоль эквипотенциальной поверхности не изменя-

ется. Следовательно  $E_{\tau} = 0$ , а это может быть, только если вектор напряженности поля перпендикулярен к поверхности.

Эти свойства записываются так: *напряженность поля равна градиенту потенциала с обратным знаком:*

$$\vec{E} = -grad \varphi \quad (5)$$

*Градиент* - это вектор, направленный в сторону наиболее быстрого возрастания потенциала и равный по величине изменению потенциала на единицу длины в этом направлении. Потенциал изменяется быстрее всего в направлении, перпендикулярном к эквипотенциальной поверхности. Часто записывают

$E = - \frac{\partial \varphi}{\partial n}$ , где  $dn$  - элемент длины в направлении нормали к эквипотенциальной поверхности.

Эта формула может служить для приближенного вычисления напряженности поля. Пусть надо найти напряженность в некоторой точке поля. Выберем эквипотенциальные поверхности, между которыми лежит эта точка. Пусть разность потенциалов между ними  $\Delta \varphi$ , а расстояние по нормали  $\Delta l_n$ . Тогда, заменяя производную отношением конечных приращений, получим

$$E \approx \frac{\Delta \varphi}{\Delta l_n} \quad (6)$$

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 - 11

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Исследование реального электростатического поля технически довольно сложно. В настоящей работе исследуется стацио-

нарное электрическое поле в слабопроводящей бумаге при протекании постоянного тока. *Стационарное поле* - это поле, не зависящее от времени, но при этом возможно наличие движущихся зарядов. В электростатике электрическое поле внутри проводника отсутствует, но при протекании тока в проводнике существует электрическое поле, создаваемое зарядами на границе проводников с разной удельной проводимостью. При этом картина силовых линий поля, распределение напряженности и потенциала такие же, как в электростатическом поле, создаваемом тем же распределением заряда. Это позволяет моделировать электростатическое поле в диэлектриках стационарным полем в проводниках с малой удельной проводимостью. Удельная проводимость при этом играет роль диэлектрической проницаемости.

Поле внутри листа электропроводной бумаги зависит только от координат  $x$ ,  $y$  в плоскости листа и не зависит от координаты  $z$ , перпендикулярной листу. Такое поле является плоским срезом пространственного, не зависящего от  $z$  электрического поля, при этом распределение заряда также зависит только от  $x$ ,  $y$ . Круглый электрод в этом случае соответствует бесконечно длинному заряженному цилиндру, параллельному оси  $z$ . Эквипотенциальные линии являются пересечением эквипотенциальных поверхностей с плоскостью бумаги.

В слабопроводящей среде легко исследуется распределение потенциала. Если соединить две точки среды проводником, в разрыв которого включен гальванометр, то при равенстве потенциалов ток в гальванометре отсутствует. Если же потенциалы различны, то пойдет ток.

*Экспериментальная установка.* В работе исследуется распределение потенциала при протекании постоянного тока в электропроводной бумаге. Для этого строятся эквипотенциальные поверхности (линии) методом сравнения потенциалов точек бумаги и делителя напряжения. *Делитель напряжения* - это десять последовательно соединенных одинаковых сопротивлений подключенных к источнику тока. По законам последовательного со-

единения ток во всех проводниках одинаков и на каждом сопротивлении падает одно и то же напряжение. Напряжение между началом делителя и концом  $k$ -го сопротивления в этом случае

равно  $U_{AC} = k \frac{U_0}{10}$ , где  $U_0$  напряжение, подаваемое на делитель.

Между сопротивлениями делителя имеются гнезда для подключения гальванометра. К концам делителя подключаются электроды, накладываемые на электропроводную бумагу. Поверхности электродов также являются эквипотенциальными поверхностями с потенциалами равными 0 и  $U_0$ . Для исследования потенциала на бумаге используется щуп, который через гальванометр подключается к одному из сопротивлений делителя (точка **C** на схеме рис.3). Установив штекер от провода идущего к гальванометру в одно из гнезд делителя, плотно касаются концом щупа электропроводной бумаги и ищут точку **D**, при касании которой ток в гальванометре отсутствует.

По закону Ома ток в гальванометре  $J_g = \frac{U_{CD}}{R} = \frac{\varphi_C - \varphi_D}{R}$ .

Следовательно, если ток равен нулю, то потенциал точки **D** равен потенциалу точки **C**. Затем при том же положении штекера находят другие такие же точки. Все они имеют одинаковый потенциал равный потенциалу точки **C** и, следовательно, лежат на одной эквипотенциальной поверхности.

Делитель напряжения, гальванометр и ключ закреплены на специальной панели. Напряжение от источника тока подано через ключ на делитель напряжения и специальные клеммы внизу панели для подключения электродов.

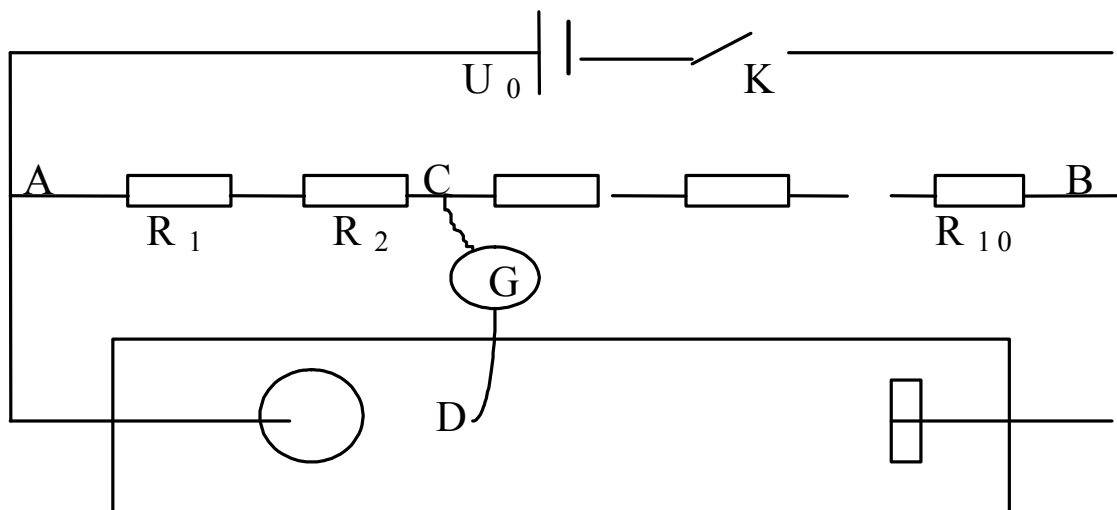


Рис.3. Схема установки.

*Порядок выполнения работы.*

1. Собирают схему (рис. 3) с электродами заданной формы:
  - а) снимают электроды и кладут лист белой бумаги, затем копировальную бумагу и сверху электропроводную бумагу;
  - б) надевают электроды на болты, подсоединяют провода и крепко завинчивают болты. Электроды должны лежать острым краем (выступом) к бумаге;
  - в) собирают остальную часть схемы.

При сборке используют панель, на которой закреплен делитель напряжения, гальванометр и ключ. Источник тока уже подсоединен к соответствующим клеммам панели.

2. Снимают эквипотенциальные поверхности. Вставляют штекер в первое гнездо делителя и на краю бумаги вблизи первого электрода щупом находят точку, в которой ток в гальванометре отсутствует. При поиске точек щуп следует переставлять, а не вести по бумаге, прижимать к бумаге плотно, но не очень сильно. По направлению отклонения стрелки гальванометра определяют, в каком направлении щуп отклонился от эквипотенциальной поверхности. Найдя точку, следует сильно нажать на щуп так, чтобы точка отпечаталась через копирку на листе бумаги. Затем находят следующие точки, двигаясь поперек листа бумаги. Точки следует брать через 15 - 20 мм (15-20 точек на линию).

После проведения первой эквипотенциальной поверхности переставляют штекер во второе гнездо делителя и находят точки на второй поверхности и т. д., до конца.

### Оформление работы.

1. По нанесенным точкам плавно проводят эквипотенциальные линии так, чтобы точки равномерно лежали по обе стороны линии. Не следует пытаться провести линию через каждую точку, она должна повторять только общий ход точек.
2. Проводят 8-10 силовых линий, начинающихся на положительном электроде и заканчивающихся на отрицательном.
3. В точках, указанных преподавателем, вычисляют напряженность поля, используя формулу (6). Измеряемое  $\Delta l$  следует показать на листе. Показать вектора напряженности в каждой точке в выбранном масштабе.

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Какая сила действует на электрон в точке с напряженностью  $2000 \text{ В/м}$ ?
2. На концах катета равностороннего прямоугольного треугольника расположены точечные заряды. Напряженности поля создаваемые каждым из этих зарядов в третьей вершине равны  $100 \text{ В/м}$  и  $140 \text{ В/м}$ . Найдите полную напряженность поля в этой вершине в двух случаях: а) заряды одного знака; б) заряды разных знаков.
3. В данную точку поля внесли пробный заряд. Как изменятся и во сколько раз напряженность и потенциал поля, сила, действующая на заряд и работа при внесении пробного заряда, если пробный заряд увеличить в два раза?
4. При перемещении заряда  $2 \text{ мкКл}$  из точки А в точку В поле совершает работу  $500 \text{ мкДж}$ . Потенциал точки А  $300 \text{ В}$ . Найдите потенциал точки В.



5. Заряд 2 мкКл перемещают вдоль сторон треугольника ABC. Потенциал точки A 100 В, потенциал точки B 400 В. При перемещении заряда из точки B в точку C поле совершает работу 500 мкДж. Найдите работу поля при перемещении заряда вдоль стороны AC.
6. Заряд 5 нКл перемещается на расстояние 20 см в направлении, составляющем угол  $30^\circ$  с силовыми линиями поля. Напряженность поля 2000 В/м. Найдите работу перемещения заряда.
7. В однородном электрическом поле с напряженностью 200 В/м находится точечный заряд 2 нКл. Найдите напряженность суммарного поля на расстоянии 30 см от заряда в направлении, составляющем угол  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  и  $180^\circ$  с силовыми линиями поля.

## ТЕМА 2-2. ПРОВОДНИКИ. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ

Свойство вещества проводить электрический ток, т.е. быть проводником, обусловлено наличием в нем свободных заряженных частиц (носителей тока), которые способны перемещаться под действием сколь угодно малой силы. Если в проводнике создать электрическое поле, то на эти частицы будет действовать сила  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ , и они начнут перемещаться в направлении силовых линий. Так как заряды не могут выйти за пределы проводника, то они будут скапливаться на его поверхности. Эти заряды, скопившиеся на поверхности проводника, создают электрическое поле, направленное против внешнего поля и такое движение будет продолжаться до тех пор, пока напряженность поля во всех точках проводника не станет равной нулю. Таким образом, при равновесии зарядов напряженность электрического поля внутри провод-

ника равна нулю. Так как  $\vec{E} = -grad\varphi$ ,  $E_l = -\frac{\partial\varphi}{\partial l}$ , то потенциал электрического поля  $\varphi$  внутри проводника при равновесии зарядов постоянен. Поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью. Следовательно, силовые линии электри-

ческого поля входят в проводник и выходят из проводника перпендикулярно его поверхности. Из теоремы Гаусса следует, что заряды при равновесии распределяются только по поверхности проводника,

*Теорема Гаусса. Поток вектора индукции через любую замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, охватываемых данной поверхностью,*

$$\Phi_D = \oint D_n dS = \sum q_i, \quad (1)$$

где  $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$  индукция электрического поля,  $D_n$  нормальная составляющая вектора индукции,  $\alpha$  - угол между вектором индукции и нормалью к элементу поверхности  $dS$  (рис. 1).

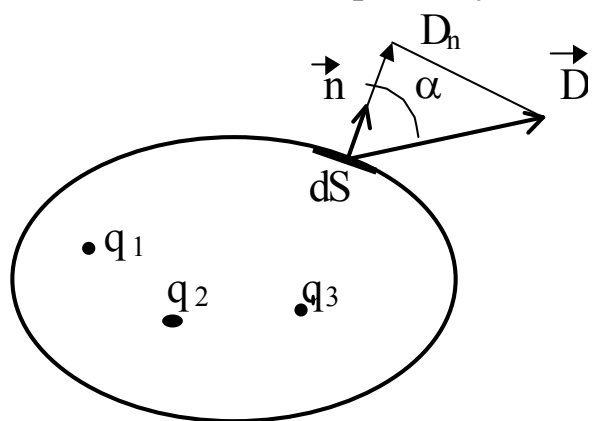


Рис. 1.

Рассмотрим произвольный малый объем внутри проводника. Так как индукция поля, как и напряженность, во всех точках проводника равна нулю, то поток вектора индукции через поверхность, ограничивающую этот объем, равен нулю, и, следовательно, полный заряд в этом объеме также равен нулю. Это справедливо для любого объема внутри проводника, поэтому заряды могут находиться только на его поверхности.

Распределение заряда по поверхности проводника описывается поверхностной плотностью заряда,  $\sigma = \frac{dq}{ds}$ , т.е. зарядом, приходящимся на единицу площади. Распределение заряда определяется формой поверхности - ее кривизной. Плотность заряда выше всего на наиболее искривленных частях поверхности, например на остриях.

Рассмотрим уединенный проводник, т.е. проводник вблизи которого нет других тел. Пока проводник не заряжен, электрическое поле отсутствует и потенциал проводника равен нулю. Если зарядить проводник, то вокруг него появится электрическое поле и проводник приобретет потенциал, одинаковый во всех точках проводника. Этот потенциал пропорционален величине сообщенного проводнику заряда, а также зависит от размеров и формы проводника и диэлектрика, окружающих проводник.

*Емкостью проводника* называется физическая величина, равная количеству электричества, которое необходимо сообщить проводнику, чтобы изменить его потенциал на единицу:

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (2)$$

Емкость проводника зависит от его размеров, формы и диэлектрической проницаемости окружающей среды.

Емкость уединенного шара. Так как потенциал поля шара равен  $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}$ , то при  $r = R$ , где  $R$  - радиус шара, получим что потенциал на поверхности шара равен:

$$\varphi_1 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R}, \text{ тогда}$$

$$C = \frac{q}{\varphi_1} = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R \quad (3)$$

В системе СИ за единицу емкости принимают емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда в 1 Кл. Эта единица электроемкости называется фарад (Ф). Так как фарад - очень большая единица, то на практике используются: микрофарад ( $10^{-6}$  Ф), нанофарад ( $10^{-9}$  Ф), пикофарад ( $10^{-12}$  Ф).

*Проводники мало пригодны для накопления заряда в электрических цепях.* Отдельный проводник обладает малой емкостью, так как поле проводника простирается на большие рас-

стояния от него, а потенциал проводника определяется интегралом от напряженности:

$$\varphi_{\text{пров.}} = \int_{(1)}^{\infty} E_e dl, \text{ где точка (1) находится}$$

на поверхности проводника. Для того чтобы получить большие емкости, нужно ограничить область пространства, в которой поле отлично от нуля. Вторым недостатком проводников как емкости заключается в том, что их емкость зависит от положения других проводников и диэлектриков вблизи проводника.

Чтобы иметь возможность накапливать значительные заряды, используют устройства, называемые конденсаторами. Конденсаторы представляют собой систему проводников (обкладок), заряженных равными по величине и противоположными по знаку зарядами, так, что электрическое поле, создаваемое ими, сосредоточено между обкладками. Под емкостью конденсатора понимается величина, численно равная отношению заряда на одной из пластин  $q$  к разности потенциалов  $U$  между пластинами:

$$C = \frac{q}{U} \quad (4)$$

*Емкость плоского конденсатора.* Пусть площадь обкладки  $S$  заряд на ней  $q$ , между обкладками находится диэлектрик с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  (рис.2). Напряженность

электрического поля между обкладками равна  $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$ , где

$$\sigma = \frac{q}{S}, \text{ поэтому } E = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0 S}.$$

Разность потенциалов между обкладками  $U = Ed$ , где  $d$  -

расстояние между ними. Тогда  $U = \frac{q d}{\epsilon \epsilon_0 S}$ . Подставляя в

(4), получим окончательно

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d} \tag{5}$$

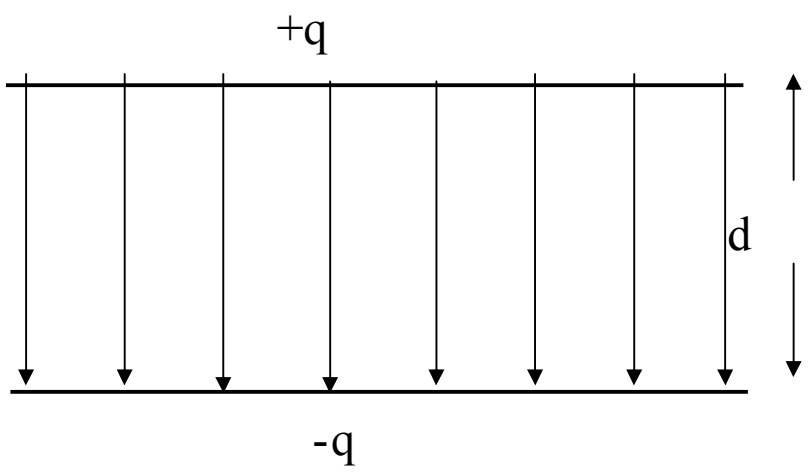


Рис.2.

Параллельное соединение конденсаторов показано на

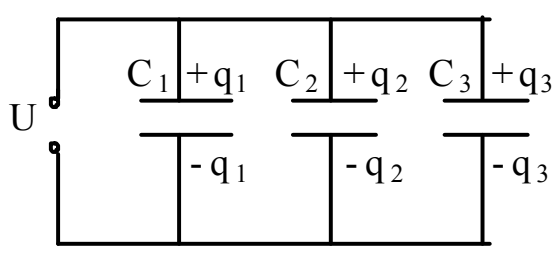


Рис. 3.

рис.3. При параллельном соединении конденсаторов напряжения на всех конденсаторах одинаковы:

$U = U_1 = U_2 = U_3$ , полный заряд батареи  $q$  равен сумме зарядов на отдельных конденсаторах  $q = q_1 + q_2 + q_3$ .

Таким образом, емкость батареи:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q_1}{U_1} + \frac{q_2}{U_2} + \frac{q_3}{U_3} = C_1 + C_2 + C_3 \tag{6}$$

Последовательное соединение показано на рис.4. При последовательном соединении полное напряжение, приложенное к батарее, равно сумме на-

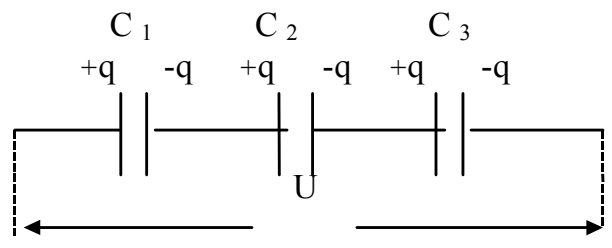


Рис. 4

пряжений на каждом конденсаторе  $U=U_1 + U_2 +U_3$  . Участки цепи, соединяющие разноименно заряженные пластины конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  , а также  $C_2$  и  $C_3$  , не получают заряда извне, поэтому суммарный заряд на них равен нулю. Следовательно,  $q_1 = q_2 = q_3 = q$  - заряду, сообщенному батарее конденсаторов. Тогда

$$\frac{1}{C} = \frac{U}{q} = \frac{U_1}{q_1} + \frac{U_2}{q_2} + \frac{U_3}{q_3} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (7)$$

*Энергия электрического поля.* При заряде конденсатора (или проводника) совершается работа, которая идет на увеличение энергии электрического поля конденсатора. Конденсатор можно зарядить, перенося последовательно малые заряды  $dq$  с отрицательной пластины на положительную. При этом совершается элементарная работа  $dA = U \cdot dq$  , где  $U$  - напряжение на конденсаторе в данный момент. Оно определяется зарядом, уже накопленным на пластине:  $U = q/c$  . Полная работа заряда конденсатора равна сумме элементарных работ:

$$A = \int dA = \int_0^q \frac{q dq}{C} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}. \quad (8)$$

Эта работа равна энергии электрического поля заряженного конденсатора:

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}. \quad (9)$$

Энергия электрического поля распределена по всему пространству, в котором поле отлично от нуля. *Объемная плотность энергии* - это энергия, приходящаяся на единицу объема  $\omega=dW/dV$ , она зависит от напряженности электрического поля. Чтобы найти эту зависимость рассмотрим плоский конденсатор. Так как, внутри конденсатора поле однородное, то для конденсатора должно быть  $W = \omega V$ . Подставляя в (9) формулу емкости

плоского конденсатора (5) , получим

$$W = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S U^2}{2 d} , \text{ вы-}$$

разим напряжение через напряженность поля внутри конденсато-  
ра  $U=Ed$ . Тогда

$$W = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} S d = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} V . \quad \text{Отсюда}$$

$$\varpi = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} \quad (10)$$

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 - 2 1

### ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА БАЛЛИСТИЧЕСКИМ ГАЛЬВАНОМЕТРОМ

Емкость конденсатора можно рассчитать по (4), если изме-  
рить приложенное напряжение и накопленный на конденсаторе  
заряд. Напряжение может быть измерено вольтметром. Для изме-  
рения заряда используется *баллистический гальванометр*.  
Баллистический гальванометр измеряет заряд переносимый ко-  
ротким импульсом тока. При этом отмечается максимальный от-  
брос стрелки гальванометра, который пропорционален протек-  
шему заряду. Конструктивно баллистический гальванометр отли-  
чается от обычного большим периодом собственных колебаний,  
так как длительность импульса тока должна быть много меньше  
периода колебаний. Заряд  $q$ , перенесенный импульсом тока,  
определяется соотношением

$$q = b \alpha , \quad (12)$$

где  $b$  - баллистическая постоянная гальванометра, а  
 $\alpha$  - максимальный отброс стрелки гальванометра.

В данной работе постоянная гальванометра определяется студентом экспериментально при градуировке гальванометра. Для этого применяют конденсатор с известной емкостью.

*Цель работы.*

1. Экспериментально определить баллистическую постоянную гальванометра.
2. Определить емкость неизвестного конденсатора.
3. Определить емкость двух конденсаторов, соединенных последовательно и параллельно.

*Установка.* Электрическая схема должна обеспечивать заряд конденсатора до определенного напряжения, регулировку и измерение этого напряжения, разряд конденсатора через баллистический гальванометр. В момент разряда конденсатора он должен быть отключен от источника напряжения. Для этого используется трехполюсный ключ  $K_2$ , в котором средний контакт замкнут с левым. При нажатии кнопки средний контакт размыкается с левым и замыкается на правый. К среднему контакту подключается одна обкладка конденсатора, к левому - источник напряжения, а к правому - баллистический гальванометр. Электрическая схема содержит цепь заряда и цепь разряда конденсатора. Цепь заряда представляет собой потенциометр с вольтметром. Все элементы схемы кроме потенциометра, источника тока, вольтметра и гальванометра собраны на специальной панели. Выносные приборы сначала подключаются к специальным клеммам на панели, а лишь затем соединяются с остальными элементами. На панели имеются эталонный конденсатор и конденсатор неизвестной емкости.



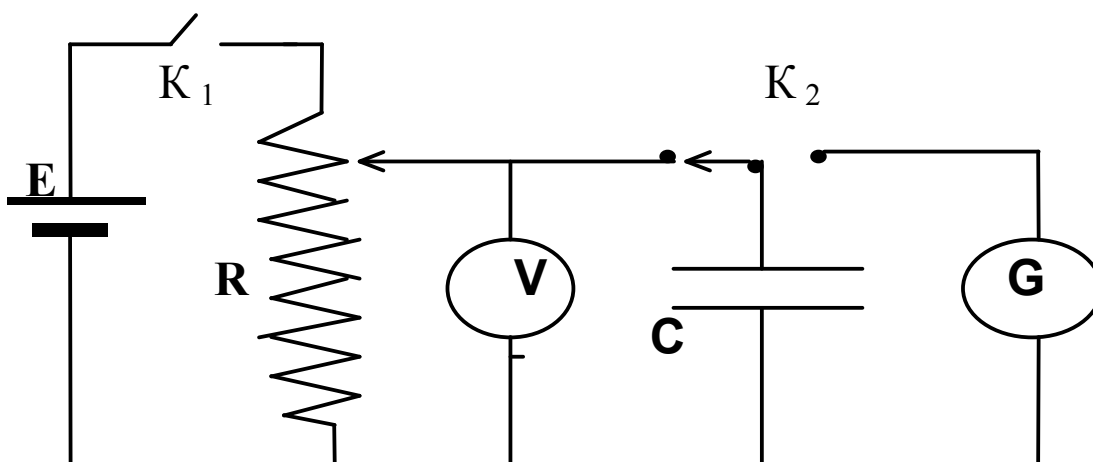


Рис. 5

*Порядок выполнения работы.*

1. Собрать цепь в соответствии со схемой (рис.5) с эталонным конденсатором.
2. Подавая на конденсатор с известной емкостью  $C_э$  различные напряжения, получить 5-7 различных отбросов светового зайчика вплоть до максимально возможных. Результаты измерений занести в табл.1.
3. Включить в цепь конденсатор с неизвестной емкостью  $C_x$  и проделать 5-7 измерений при различных напряжениях. Результаты измерений занести в табл.2.
4. Однократно измерить емкости последовательно и параллельно соединенных конденсаторов.
5. Рассчитать постоянную гальванометра  $b$  и ее погрешность.
6. Рассчитать емкость конденсатора  $C_x$  и его погрешность.
7. Построить график зависимости заряда от напряжения на конденсаторе неизвестной емкости.
8. Вычислить емкости последовательного и параллельного соединения конденсаторов и их погрешности. Результаты занести в табл. 3.
9. Рассчитать напряжения и заряды на каждом конденсаторе при последовательном и параллельном соединении и занести в табл. 3. При расчете использовать значения  $C_э$  и  $C_x$ .

Таблица 1.

№	$U$ В	$\alpha$ дел	$q$ мкКл	$b$ мкКл/дел	$\Delta b$	$(\Delta b)^2$	Результат
1							
2							
....							
Среднее					$S_b^2 =$		$b =$

Таблица 2.

№	$U$ В	$\alpha$ дел	$q$ мкКл	$C_x$ мкФ	$\Delta C$	$(\Delta C)^2$	Результат
1							
2							
....							
Среднее					$S_c^2 =$		$C =$

Таблица 3.

Соединение	$U$ , В	$\alpha$ , дел	$q$ , мкКл	$C_{изм}$ , мкФ	$U_{\varepsilon}$	$U_x$	$q_{\varepsilon}$	$q_x$	$C_{расч}$
парал.									
послед.									

## Контрольные вопросы и задачи

1. На рис.7 изображена схема зарядов и две замкнутые поверхности. Найдите потоки вектора индукции через эти поверхности.

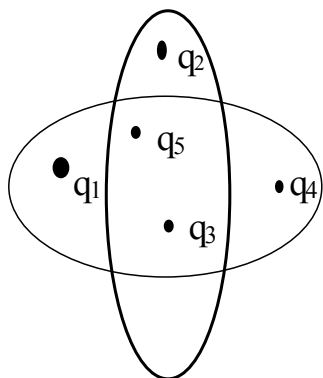


Рис.6.

Заряды равны:  $q_1 = 2$  нКл,  $q_2 = -5$  нКл,  $q_3 = 3$  нКл,  $q_4 = -4$  нКл,  $q_5 = -2$  нКл,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м

2. Проводник заряжен до потенциала 5 В. Когда ему сообщили заряд 10 нКл, его потенциал увеличился в 1,4 раза. Найдите емкость проводника.
3. Найдите емкость шарового конденсатора с радиусами сфер  $R_1$  и  $R_2$ .
4. Какова емкость конденсатора, если расстояние между его обкладками 0,2 мм, и при сообщении ему заряда 5 нКл, средняя напряженность поля между обкладками  $E = 10^4$  В/м.
5. К заряженному до 10 В и отключенному от источника напряжения конденсатору емкостью 3 мкФ, подключили параллельно конденсатор емкостью 2 мкФ. Какое напряжение установится при этом, Какое количество тепла выделяется при их соединении,
6. Внутри полого металлического шара с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , расположена металлическая сфера радиуса  $R$ . Сфере сообщен заряд  $+q$ . Нарисуйте график  $\varphi(r)$ .
7. Между пластинами плоского конденсатора расположены три слоя диэлектрика толщиной 0,2; 0,3; 0,5 мм. Когда конденсатору сообщили заряд 10 мкКл, напряженность поля в слоях оказалась равной  $3 \cdot 10^4$ ,  $4 \cdot 10^4$  и  $2 \cdot 10^4$  В/м. Найдите емкость конденсатора.
8. Расстояние между пластинами плоского конденсатора 5 мм. Между ними расположена металлическая пластина толщиной 2 мм. Площадь пластин конденсатора 2 дм<sup>2</sup>. Конденсатор заряжен до напряжения 20 В. Чему равна емкость конденсатора?

Как изменится напряжение на конденсаторе, если вынуть стеклянную пластину, какую при этом нужно совершить работу? Конденсатор отключен от источника напряжения.

### *Библиографический список*

- Савельев И.В. Курс общей физики. В 3 т. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.СПб: Лань, 2008.  
Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. В 3 т. Т.2. Электричество и магнетизм. СПб: Лань, 2007.

### *Содержание*

Тема 2-0. Законы постоянного тока . . . . .	3
Лабораторная работа № 2-01. Изучение законов постоянного тока . . . . .	12
Тема 2-1. Электрическое поле . . . . .	15
Лабораторная работа № 2-11. Исследование электрического поля . . . . .	20
Тема 2-2. Проводники. Емкость . . . . .	25
Лабораторная работа № 2-21. Измерение емкости конденсатора баллистическим гальванометром . . . . .	31
Библиографический список . . . . .	35

### Учебное издание

Владимир Михайлович Максимов  
Владимир Олегович Кабанов  
Сергей Александрович Поржецкий  
Владимир Константинович Козырев

Александр Леонидович Ашкалуни

ФИЗИКА  
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Учебно-методическое пособие  
к лабораторным работам № 2-01,2-11,2-21

Корректор Т.А.Смирнова

Техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2013 г., поз. 40

---

Подп. к печати 22.03.2013. Формат 60X84/16. Бумага тип № 1.

Печать офсетная. Объем 2,25 уч.-изд.л., 2,25 печ.л. Тираж 300.

Изд.№ 40. Цена «С». Заказ

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, Санкт-Петербург, ул.Ивана Черных, 4.