

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра физики

## **ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Лабораторная работа № 78**

Методические указания  
к лабораторным работам по физике  
для студентов всех направлений подготовки

Казань  
2013

УДК 621.3  
ББК 31.211  
П64

П64 Цепи постоянного тока. Лабораторная работа № 78: Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов всех направлений подготовки / Сост. Л.И. Потапова. Под редакцией В.В. Алексеева, Л.И. Маклакова. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2013. – 12 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

В данной лабораторной работе используется компьютерная модель «Открытая физика 1.1», разработанная фирмой «Физикон», которая позволяет собрать эквивалентную цепь, на которой проводятся измерения параметров цепи.

Методом компьютерного моделирования исследуется модель простейшей разветвлённой электрической цепи, состоящей из трёх источников ЭДС, подключённых параллельно к нагрузке. Дана краткая теория, рассмотрены законы Ома и правила Кирхгофа.

Данная работа соответствует программе курса физики инженерно-технических специальностей высших учебных заведений и предназначена для бакалавров дневного и заочного отделений всех направлений Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

Илл. 4, табл. 3.

Рецензент  
Доцент кафедры автоматики и электротехники  
**В.С. Дериновский**

УДК 621.3  
ББК 31.211

© Казанский государственный  
архитектурно-строительный  
университет, 2013

© Потапова Л.И., 2013

## ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрическим током называют любое упорядоченное движение электрических зарядов. Ток может течь в твёрдых телах (металлы, полупроводники), в жидкостях (электролиты) и в газах. Для протекания тока необходимо наличие в данном теле (или в данной среде) заряженных частиц, которые называются *носителями тока*. Ими могут быть электроны, ионы, либо макроскопические частицы, несущие на себе избыточный заряд (например, заряженные пылинки и капельки жидкости).

Ток возникает при условии, что внутри тела существует электрическое поле.

Количественной характеристикой электрического тока служит величина заряда, переносимого через рассматриваемую поверхность в единицу времени. Её называют силой тока.

Если за время  $dt$  через поверхность переносится заряд  $dq$ , то сила тока равна

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (1)$$

За направление тока принимается направление, в котором перемещаются положительные носители тока.

Распределение силы тока по поперечному сечению проводника характеризуют плотностью тока. Плотность тока равна силе тока, протекающего через единицу поперечного сечения проводника. Если через элементарную площадку  $dS$ , расположенную перпендикулярно к направлению протекания тока, протекает ток силой  $dI$ , то плотность тока равна:

$$j = \frac{dI}{dS}. \quad (2)$$

Зная плотность тока в каждой точке поверхности, можно найти силу тока  $I$  через любую поверхность  $S$ :

$$I = \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} \quad (3)$$

Ток, не изменяющийся со временем, называется постоянным. Для постоянного тока справедливо соотношение:

$$I = \frac{q}{t}, \quad (4)$$

где  $q$  – заряд, переносимый через рассматриваемую поверхность за конечный промежуток времени  $t$ .

В системе СИ единица силы тока – ампер (А).

Если в проводнике создать электрическое поле и не принимать мер для его поддержания, то перемещение носителей тока очень быстро приводит к тому, что поле внутри проводника исчезает и ток прекращается. Для того чтобы поддерживать ток достаточно длительное время, нужно от конца проводника с меньшим потенциалом (носители тока предполагаются положительными) непрерывно отводить приносимые сюда током заряды, а от конца с большим потенциалом непрерывно их отводить. Иными словами, необходимо осуществить круговорот зарядов, при котором они двигались бы по замкнутому пути. Такое перемещение носителей возможно лишь с помощью сил не электростатического происхождения, называемых *сторонними силами*.

Эти силы могут быть обусловлены химическими процессами, диффузией носителей тока в неоднородной среде или через границу раздела двух разнородных веществ, электрическими (но не электростатическими) полями, порождаемыми меняющимися во времени магнитными полями.

Сторонние силы можно охарактеризовать работой, которую они совершают над перемещающимися по цепи зарядами. Величина, равная работе сторонних сил над единичным положительным зарядом, называется *электродвижущей силой* (ЭДС)  $\varepsilon$ , действующей в цепи. Следовательно, если работа сторонних сил над зарядом  $q$  равна  $A^{\text{стор}}$ , то

$$\varepsilon = \frac{A^{\text{стор}}}{q}. \quad (5)$$

В системе СИ ЭДС измеряется в тех же единицах, что и напряжение, т.е. *вольтах* (В).

Сторонние силы  $F^{\text{стор}}$ , действующие на заряд  $q$ , можно представить в виде  $F^{\text{стор}} = E^{\text{стор}}q$ .

Векторную величину  $E^{\text{стор}}$  называют *напряжённостью поля сторонних сил*. Работа сторонних сил над зарядом  $q$  на участке цепи 1–2 (рис. 1) равна

$$A^{\text{стор}} = \int_{(1)}^{(2)} F^{\text{стор}} dl = q \int_{(1)}^{(2)} E^{\text{стор}} dl.$$

Разделив эту работу на  $q$ , получим ЭДС, действующую на данном участке:

$$\varepsilon = \int_{(1)}^{(2)} E^{\text{стор}} dl \quad (6)$$

Аналогичный интеграл, вычисленный для замкнутой цепи, даёт ЭДС, которая действует в этой цепи:

$$\varepsilon = \oint E^{\text{стор}} dl \quad (7)$$

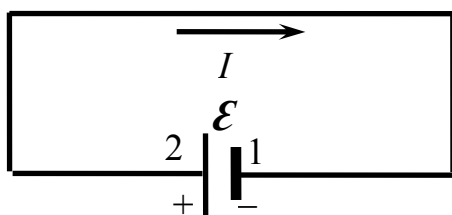


Рис. 1

Таким образом, ЭДС, действующая в замкнутой цепи, может быть определена как циркуляция вектора напряжённости сторонних сил.

Кроме сторонних сил, на заряд действуют силы электростатического поля  $F_E = qE$ . Следовательно, результирующая сила, действующая в каждой точке цепи на заряд  $q$ , равна

$$F = F_E + F_{\text{стор}} = q(E + E^{\text{стор}}).$$

Работа, совершаемая этой силой над зарядом  $q$  на участке цепи 1–2, определяется выражением

$$A^{\text{стор}} = q \left( \int_{(1)}^{(2)} E dl + \int_{(1)}^{(2)} E^{\text{стор}} dl \right) = q(\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}). \quad (8)$$

Величина, численно равная работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называется *падением напряжения* или просто *напряжением*  $U$  на данном участке цепи. В соответствии с выражением (8)

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}. \quad (9)$$

Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы, называется *однородным* (рис. 2). Участок, на котором на носители тока действуют сторонние силы, называется *неоднородным*. Для однородного участка цепи (рис. 2)  $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ , т.е. напряжение совпадает с разностью потенциалов на концах участка.

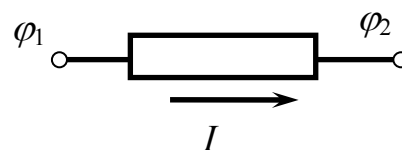


Рис. 2

Немецкий физик Георг Ом (1787–1854) экспериментально установил закон, согласно которому сила тока, текущего по однородному участку цепи (т.е. цепи, на котором не действуют сторонние силы) пропорциональна напряжению  $U$  на проводнике:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (10)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление проводника. Единицей сопротивления служит Ом, равный сопротивлению такого проводника, в котором при напряжении 1 В течёт ток силой 1 А.

Величина сопротивления зависит от формы и размеров проводника, а также от свойств материала, из которого он сделан. Для однородного цилиндрического проводника

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (11)$$

где  $l$  – длина проводника;  $S$  – площадь его поперечного сечения;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление вещества. Величина удельного сопротивления определяется химической природой вещества и условиями, при которых оно находится (в частности, температурой). В системе СИ  $\rho$  измеряется в ом-метрах (Ом·м).

Из закона Ома для однородного участка цепи легко получить другой вид записи этого закона.

Найдем связь между векторами  $\vec{j}$  (плотность тока в проводнике) и  $\vec{E}$  (напряженность электрического поля). Воспользуемся тем, что в изотропном проводнике они имеют одинаковые направления и через поперечное сечение течет ток силой:

$$I = jS \quad (11a)$$

Напряжение, приложенное к проводнику:

$$U = El, \quad (12)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля (силовая характеристика поля, измеряется в СИ В/м);  $l$  – длина проводника.

Подставим (11) и (12) в выражение закон Ома (10), получим:

$$I = \frac{l}{\rho} ES. \text{ С учётом выражения (11):}$$

$$j = \frac{l}{\rho} E = \gamma E. \quad (13)$$

Здесь  $\frac{l}{\rho} = \gamma$  – удельная электропроводность проводника. Соотношение (13) называют **законом Ома в дифференциальной форме**. Эта

форма записи удобна тем, что связывает между собой плотность тока и напряжённость электрического поля в проводнике.

На неоднородном участке цепи на носители тока действуют, кроме электростатических сил, сторонние силы, как было отмечено выше. Тогда закон Ома для неоднородного участка цепи следующий:

$$I = \frac{U_{12}}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R}, \quad (14)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – потенциалы концов участка,  $\varepsilon_{12}$  – ЭДС, действующая на данном участке цепи. Положив  $\varphi_1 = \varphi_2$ , можно получить выражение закона Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R}. \quad (15)$$

Здесь  $\varepsilon$  – ЭДС действующая в цепи;  $R$  – суммарное сопротивление всей цепи.

### ПРАВИЛА КИРХГОФА

При разработке электрических и радиотехнических схем приходится сталкиваться с очень сложными разветвлёнными электрическими цепями. При этом необходимо знать, какие токи будут протекать в той или иной цепи. Для расчёта сил токов в различных участках таких цепей обычно составляется система линейных уравнений, в которые в качестве неизвестных входят силы токов в различных участках цепи. Решая такую систему, находят силы токов. Основой для составления уравнений являются правила Кирхгофа.

**Первое правило Кирхгофа.** Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, т.е. в точке разветвления проводников, равна нулю:

$$\sum_i I_i = 0. \quad (16)$$

Условно принято ток, приходящий к узлу, считать положительным, а уходящий – отрицательным. Например, для узла  $A$  (рис. 3) уравнение запишется:  $-I_1 + I_2 + I_3 = 0$ . Справедливость

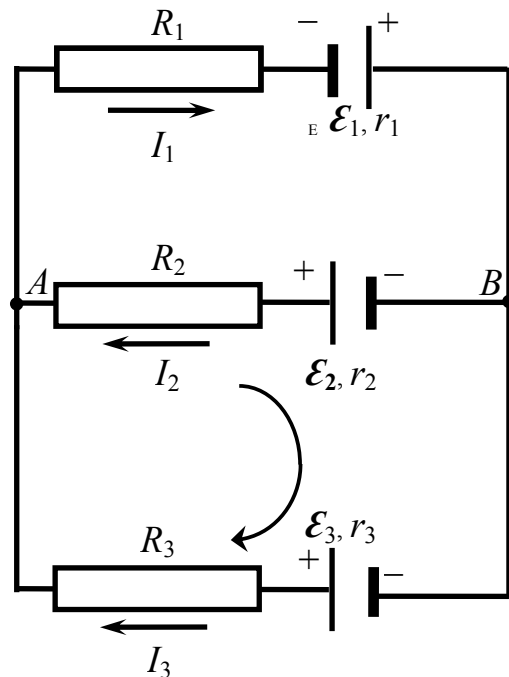


Рис. 3

этого правила следует из закона сохранения заряда. Если бы количество заряда, входящего в узел, не равнялось бы величине заряда, покидающего его, т.е. если бы алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, не была равна нулю, то в узлах происходило бы накопление заряда, приводящего к изменению потенциалов узлов, а следовательно, и изменение сил токов. Однако же ток в цепи остаётся постоянным. Поэтому должно выполняться и первое правило Кирхгофа. Необходимо отметить, что число уравнений, которое можно составить для узлов, на единицу меньше общего числа узлов в разветвлённой цепи. Так, например, в электрической цепи, приведённой на рис. 3, всего два узла –  $A$  и  $B$ . Поэтому можно составить только одно уравнение для узла  $A$  или  $B$ . Число неизвестных токов всегда больше числа уравнений, составленных для узлов. В силу этого для определения всех неизвестных величин необходимо составить дополнительные уравнения, используя второе правило Кирхгофа (правило для контуров).

**Второе правило Кирхгофа.** *Алгебраическая сумма напряжений (произведений сил токов на сопротивления) в ветви любого замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС, встречающихся в этом контуре:*

$$\sum_k U_k = \sum_j \mathcal{E}_j \quad \text{или} \quad \sum_k I_k R_k = \sum_j \mathcal{E}_j. \quad (17)$$

Необходимо отметить, что сопротивления  $R_k$  включают в себя и внутренние сопротивления источников тока. Так, замкнутым является контур  $AB\varepsilon_3A$  (рис. 3).

Второе правило Кирхгофа является следствием закона сохранения и превращения энергии. При применении этого правила выбирается какое-нибудь направление обхода, например, по часовой стрелке и уславливаются о правиле знаков:

а) если токи  $I_k$  текут в направлении обхода, то соответствующие произведения  $I_k R_k$  берутся со знаком плюс, в противном случае – со знаком минус;

б) если в направлении обхода внутри источника происходит переход от отрицательного полюса к положительному полюсу, то ЭДС берётся со знаком плюс, в противном случае – с минусом. Например, для замкнутого контура  $AB\varepsilon_3A$  уравнение записывается в виде  $-I_2(R_2 + r_2) + I_3(R_3 + r_3) = \varepsilon_3 - \varepsilon_2$ .

Если после решения системы уравнений силы токов в каких-либо участках получаются отрицательными, то это означает, что в действительности направление этих токов противоположно направлению, выбранному при расчёте. Следует отметить, что число уравнений, которое возможно для контуров, на единицу меньше общего числа замкнутых контуров разветвлённой цепи. Так, в электрической схеме, показанной на рис. 3 число возможных замкнутых контуров три –  $AE_1B\varepsilon_3A$ ,  $AE_1B\varepsilon_2A$  и  $AB\varepsilon_3A$ . Следова-



тельно, можно составить лишь два уравнения для любых указанных контуров. При этом надо составить столько уравнений для замкнутых контуров, чтобы в сумме с числом уравнений для узлов оно равнялось бы числу неизвестных токов, которые и нужно определить. Каждый новый контур при этом должен содержать хотя бы один участок цепи, не вошедший в уже рассмотренные контуры.

Например, для указанной цепи (рис. 3) составляют одно уравнение для узла  $A$  и два для замкнутых контуров  $AB\varepsilon_3A$  и  $A\varepsilon_1BA$ :

$$\left. \begin{aligned} -I_1 + I_2 + I_3 &= 0, \\ -I_2(R_2 + r_2) + I_3(R_3 + r_3) &= \varepsilon_3 - \varepsilon_2, \\ I_1(R_1 + r_1) + I_2(R_2 + r_2) &= \varepsilon_2 + \varepsilon_1. \end{aligned} \right\}$$

Зная величины сопротивлений и ЭДС, находят силы токов, решив эту систему уравнений.

Отметим, что можно выбрать и другие два из трёх указанных замкнутых контуров, как и другой узел ( $B$ ). Результат по расчёту сил токов и напряжений от этого не изменится.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Знакомство с компьютерным моделированием цепей постоянного тока.
2. Экспериментальное подтверждение законов Ома и Кирхгофа.

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

**В данной лабораторной работе, используется компьютерная модель «Открытая физика 1.1», разработанная фирмой «Физикон».**

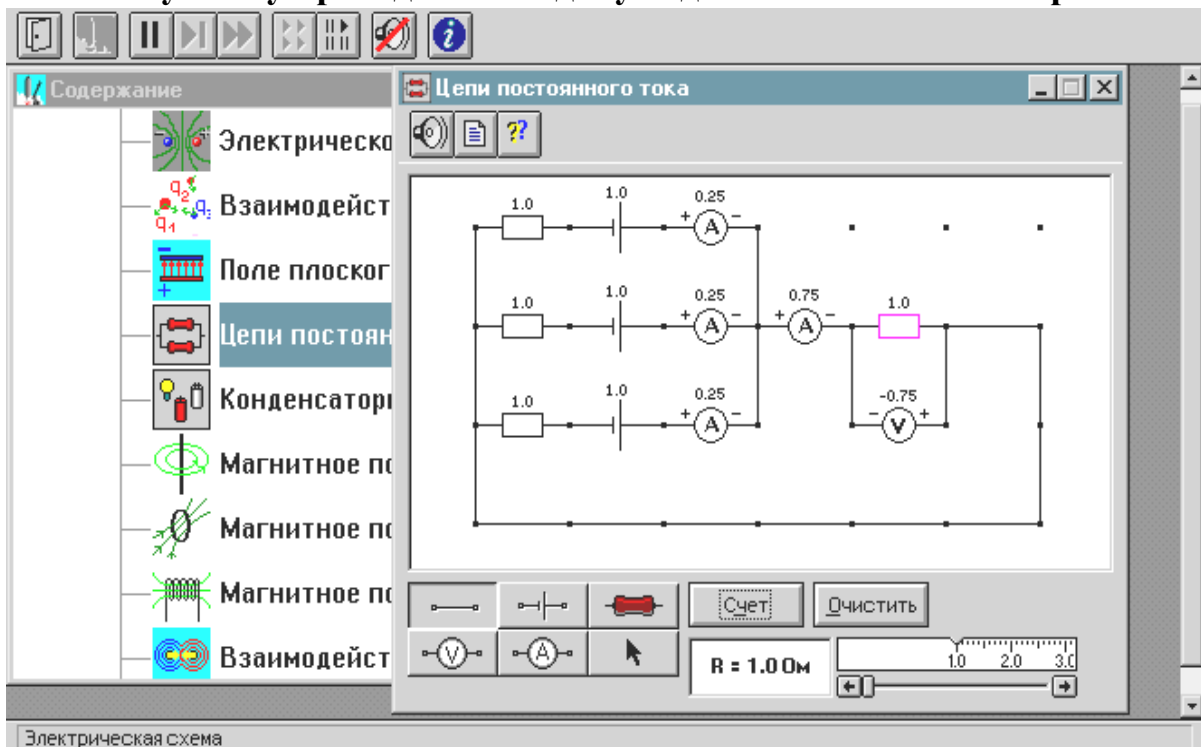
Для начала работы необходимо дважды щёлкнуть левой кнопкой мыши, когда её маркер расположен над эмблемой сборника компьютерных моделей. После этого необходимо дважды щёлкнуть левой кнопкой мыши, установив её маркер над названием раздела, в котором расположена данная модель.

Запустите программу «Эл-магн. Кванты». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Цепи постоянного тока». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы.

В данной лабораторной работе исследуется модель простейшей разветвлённой электрической цепи, состоящей из трёх источников ЭДС, подключённых параллельно к одному резистору (нагрузке). (Здесь также есть возможность ознакомиться с теорией.) Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.

Нарисуйте в конспекте эквивалентную схему цепи, расположив источники один под другим и учитывая наличие внутреннего сопротивления у каждого источника. Укажите знаки ЭДС, направления токов в каждом участке и направления обхода каждого замкнутого контура. Составьте систему уравнений для нахождения токов в каждом участке.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**



## ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЯ

Соберите на экране заданную эквивалентную цепь.

1. Для этого сначала щёлкните левой кнопкой мыши над кнопкой ЭДС в нижней части экрана. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Ориентируйтесь на рисунок схемы в описании к данной лабораторной работе. Щёлкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будет расположен первый источник ЭДС. Переместите маркер мыши вниз на одну клетку и снова щёлкните левой кнопкой под

тем местом, где расположился первый источник. Там появится второй источник ЭДС. Аналогично разместите и третий источник.

2. Разместите далее последовательно с каждым источником резистор, изображающий его внутреннее сопротивление (нажав предварительно кнопку  $R$  в нижней части экрана) и амперметр (кнопка  $A$  там же).

3. Затем расположите резистор нагрузки и последовательно соединённый с ним амперметр.

4. Под нагрузкой расположите вольтметр, измеряющий напряжение на нагрузке.

5. Подключите соединительные провода. Для этого нажмите кнопку провода внизу экрана, после чего переместите маркер мыши в рабочую зону схемы. Щёлкните левой кнопкой мыши в точке, где проходит провод.

6. Установите значения параметров для каждого элемента. Для этого щёлкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой. Затем щёлкните на данном элементе. Подведите маркер мыши к движку появившегося регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая её в нажатом состоянии, меняйте величину параметра. Установите числовое значение, равное значению, взятому из таблицы 1 для вашего варианта.

7. Установите сопротивления резистора нагрузки  $R = 1$  Ом.

8. Измерьте значения всех токов и напряжения на нагрузке (щёлкнув мышью по кнопке «Счёт») и запишите их в табл. 2.

9. Меняя сопротивление  $R$ , повторите измерения параметров и заполните табл. 2.

Таблица 1

**Значения ЭДС и внутреннего сопротивления источников**  
(не перерисовывать)

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ [В]	3; 7; -2	4; -3; -8	3; 6; -4	6, -2, -8	-6; 5; 8	5; 8; -4	-4; 6; -7	8, -4; 6
$R_1, R_2, R_3$ [Ом]	2; 1; 1	1; 3; 1	2; 1; 2	1; 1; 2	2; 1; 1	1; 2; 1	1; 1; 2	1; 3; 1

Таблица 2  
Результаты измерений

R[Ом]	I <sub>1</sub> [A]	I <sub>2</sub> [A]	I <sub>3</sub> [A]	I [A]	U [В]
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Таблица 3  
Результаты расчета

I <sub>1</sub> [A]	I <sub>2</sub> [A]	I <sub>3</sub> [A]	I [A]

### ЗАДАНИЕ

1. Нарисуйте в конспекте эквивалентную схему цепи, расположив источники один под другим и учитывая наличие внутреннего сопротивления у каждого источника.
2. Укажите знаки ЭДС, направления токов в каждом участке и направления обхода каждого замкнутого контура.
3. Запишите для вашей цепи решение системы уравнений для всех токов в общем виде.
4. Рассчитайте значения всех токов для каждого сопротивления нагрузки и запишите в табл. 3.
5. Постройте график экспериментальной зависимости падения напряжения  $U$  на нагрузке от силы тока  $I$ , текущего через неё.
6. Сформулируйте выводы по графику.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое электрический ток? Дайте определение силы тока.
2. Дайте определение разности потенциалов (напряжения).
3. Напишите формулы для сопротивления при последовательном и параллельном соединённых резисторов.
4. Напишите закон Ома для однородного участка цепи. Сравните его с законом Ома в дифференциальной форме.
5. Какой участок цепи называется неоднородным?
6. Запишите закон Ома для неоднородного участка цепи.
7. Какими характеристиками описывается источник ЭДС?
8. Сформулируйте и запишите первый закон Кирхгофа. Какое свойство заряда он отражает?
9. Сформулируйте и запишите второй закон Кирхгофа.
10. Что такое узел электрической цепи?
11. Что такое полная электрическая цепь?

## **ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **Лабораторная работа №78**

Методические указания к лабораторным работам  
по физике для студентов всех направлений подготовки

Составитель Потапова Л.И.