

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Вологодская государственная  
молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина»

*Технологический факультет*  
*Кафедра технологического оборудования*

Е.В. Славоросова

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

*Учебно-методическое пособие*  
к лабораторным работам по физике  
для студентов по направлению подготовки:  
35.03.06 Агроинженерия

Вологда – Молочное  
2023

УДК 537(07)  
ББК 22.33 я37  
К44

**Р е ц е н з е н т ы:**

канд. экон. наук, доцент кафедры технические системы в агробизнесе

**В.Ю. Ивановская;**

канд. техн. наук, доцент кафедры технологического оборудования

**Ю.В. Виноградова**

**Славорова Е.В.**

К44      Электричество и магнетизм: учебно-методическое пособие/ Е.В. Славорова.– Вологда – Молочное: ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА, 2023. – 96 с.

**ISBN 978-5-98076-305-3**

Учебно-методическое пособие к лабораторным работам по электромагнетизму предназначено для студентов по направлению подготовки: 35.03.06 Агроинженерия.

Настоящее издание отличается от предыдущего переработкой теоретической части изучаемых вопросов. Лабораторные работы охватывают основные разделы физики по курсу «Электричество и магнетизм».

Рекомендовано методическим советом академии в качестве учебно-методического пособия и печатается по решению редакционно-издательского совета ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА.

УДК 537(07)  
ББК 22.33 я37

**ISBN 978-5-98076-305-3**

© Славорова Е.В., 2023  
© ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА, 2023

## Введение

Современный прогресс науки и техники во многом обязан развитию физической науки. Поэтому не случайно уделяется большое внимание повышению научной подготовки инженерных кадров. Выпускники вузов должны быть вооружены необходимым минимумом знаний по курсу физики, являющейся основой изучения всех общетехнических и специальных дисциплин.

Большое значение при изучении курса общей физики придается физическому практикуму. В условиях физической лаборатории студенты самостоятельно проводят экспериментальные исследования, получают необходимые навыки, осмысливают наблюдаемые явления, обрабатывают полученные результаты и делают необходимые выводы. Приобретенные навыки окажут неоценимую помощь в процессе дальнейшего усвоения учебного материала, а затем и в процессе производственной деятельности.

Учебно-методическое пособие по разделу физики «Электричество и магнетизм» содержит 8 лабораторных работ. Особенностью построения каждой лабораторной работы является то, что вначале дается теоретическое обоснование рассматриваемого явления, затем приводится описание установки, приборов и порядок выполнения. В теоретической части каждой работы особое внимание уделяется сущности физических явлений и процессов.

При выполнении лабораторных работ студент обязан сдать письменный отчет и показать:

1. Знание физического смысла измеряемой величины, методики ее измерения, а также теоретических вопросов, на которых базируется работа;
2. Умение собрать установку по принципиальной схеме и пользоваться измерительной аппаратурой;
3. Знание расчетных формул;
4. Знание степени точности результатов измерений, умение вычислить абсолютную и относительную погрешность измерений.

### Правила техники безопасности

Выполнение лабораторных работ по электричеству и магнетизму связано со сборкой электрических цепей, применением ис-

точников повышенных напряжений и сопряжено с опасностью поражения электрическим током.

При выполнении лабораторных работ **необходимо соблюдать следующие правила:**

1. Сборку электрических цепей следует производить в такой последовательности, чтобы источник тока присоединился в последнюю очередь. Запрещается подключать цепь к источнику тока без предварительной проверки ее преподавателем или лаборантом.
2. Собирая электрическую цепь, следует размещать приборы на столе так, чтобы регулировать их и выполнять по ним отсчет можно было просто и удобно.
3. Все соединения следует производить только проводами с неповрежденной изоляцией, надежно закрепляя их в зажимах.
4. Все имеющиеся в цепи реостаты должны быть установлены на максимально возможное сопротивление.
5. Все выключатели и переключатели во время сборки цепи должны быть разомкнуты.
6. Запрещается прикасаться руками к зажимам, находящимся под напряжением. В случае необходимости напряжение на зажимах приборов или на элементах цепи следует проверять только измерительным прибором.
7. Не разрешается держать электрическую цепь под током длительное время. Цепь следует замыкать только на время измерений.
8. Все изменения в цепи или устранении причин ее неисправности можно производить только после полного отключения источников питания. Запрещается делать изменения в цепях, находящихся под напряжением.
9. После окончания измерений следует полученные результаты показать преподавателю и, получив разрешение, разобрать электрическую цепь. Запрещается разбирать цепь, если она не отключена от источника питания.
10. Разобрав электрическую цепь, следует аккуратно сложить соединительные провода, установить на определенные места приборы и привести рабочий стол в полный порядок.

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА САМОИНДУКЦИИ,  
ЕМКОСТИ И ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА  
ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

ТЕОРИЯ ЯВЛЕНИЯ

При действии в замкнутом контуре переменной электродвижущей силы в нем возникает **переменный ток**. Сила такого переменного тока может быть непостоянной в различных сечениях неразветвленного проводника. Это отступление от основного требования, которому удовлетворяет постоянный ток, обусловлено конечной скоростью распространения электромагнитных полей. Электромагнитные поля распространяются по цепи со скоростью света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Если за время  $t = \frac{l}{c}$ , необходимое для передачи напряжения в самую отдаленную точку цепи, сила тока изменяется незначительно, то мгновенное значение силы тока во всех сечениях цепи будут практически одинаковым.

Токи, удовлетворяющие такому условию, называются КВАЗИСТАЦИОНАРНЫМИ.

**Переменным электрическим током** называется ток, гармонически меняющийся с течением времени. В случае синусоидального переменного тока **сила тока изменяется по закону:**

$$i = I_0 \cdot \sin \omega t,$$

где  $i$  – мгновенное значение силы тока,

$I_0$  – амплитудное значение силы тока,

$\omega$  – круговая частота, связанная с частотой и периодом соотношением

$$\left( \omega = 2\pi \cdot \nu = \frac{2\pi}{T} \right),$$

$\omega t$  – фаза колебаний.

Величина и направление переменного тока периодически изменяются с течением времени.

Процессы, протекающие в цепях переменного тока, сложнее, чем в цепях постоянного тока.

Мгновенные значения квазистационарных токов подчиняются закону Ома, а следовательно, и вытекающим из него правилам Кирхгофа.

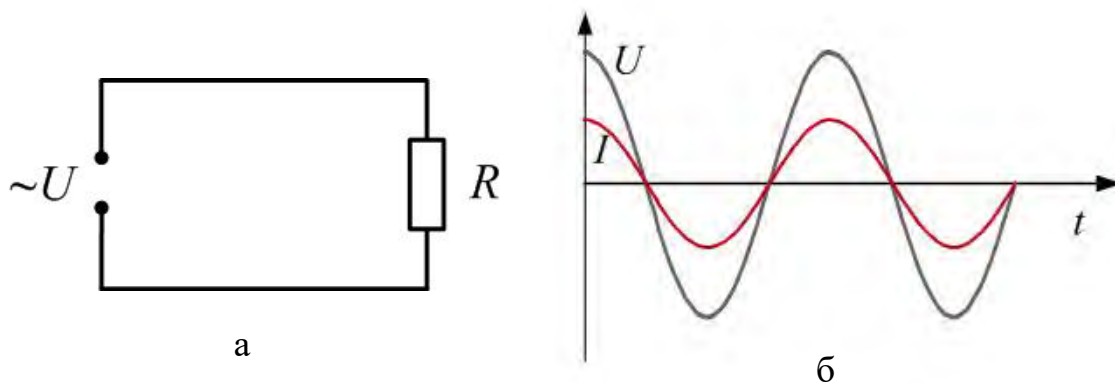
**Рассмотрим:**

**а) Омическое (активное) сопротивление в цепи переменного тока.**

Пусть к активному сопротивлению приложено переменное синусоидальное напряжение (рис. 1, а).

$$u_R = U_0 \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

Тогда сила тока в цепи будет изменяться по такому же синусоидальному закону ( $i = I_0 \cdot \sin \omega t$ ), что и напряжение.

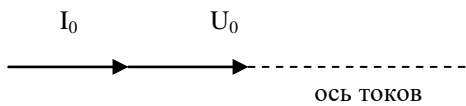


Р и с. 1, а, б

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_0}{R} \sin \omega t = I_0 \cdot \sin \omega t \quad (2)$$

где  $i$  – мгновенное значение тока,  
 $I_0$  – амплитудное значение тока.

Для амплитудных значений тока и напряжения закон Ома записывается в виде  $I_0 = \frac{U_0}{R}$ .



Р и с. 1, в

Сравнив выражения (1) и (2) можно сказать, что **ток, текущий через омическое сопротивление, совпадает с напряжением по фазе** (рис. 1, б).

Соотношение между переменными значениями тока и напряжения становится особенно наглядными, если изображать  $I$  и  $U$  с помощью векторных диаграмм (рис. 1, в).

В цепях переменного тока *активное сопротивление* часто называют **резистором**.

*Активное сопротивление – сопротивление элемента электрической цепи, в котором электрическая энергия необратимо преобразуется во внутреннюю (тепловую).*

**б) Емкостное сопротивление в цепи переменного тока.**

Рассмотрим процессы, протекающие в электрической цепи переменного тока с конденсатором.

Если подключить конденсатор к источнику постоянного тока, то в цепи возникнет кратковременный импульс тока, который зарядит конденсатор до напряжения источника, а затем ток прекратится. Если заряженный конденсатор отключить от источника постоянного тока и соединить его обкладки с выводами лампы накаливания, то конденсатор будет разряжаться, при этом наблюдается кратковременная вспышка лампы.

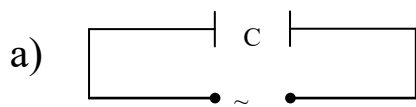
**При включении конденсатора в цепь переменного тока** процесс его зарядки *длится четверть периода*. После достижения амплитудного значения напряжение между обкладками конденсатора уменьшается, и конденсатор в течение *четверти периода разряжается*. В следующие *четверти периода* конденсатор вновь заряжается, но полярность напряжения на его обкладках изменяется на противоположную и т.д. Процессы зарядки и разрядки конденсатора чередуются с периодом, равным периоду колебаний приложенного переменного напряжения.

*Как и в цепи постоянного тока, через диэлектрик, разделяющий обкладки конденсатора, электрические заряды не проходят. Но в результате периодически повторяющихся процессов зарядки и разрядки конденсатора по проводам, соединенным с его*

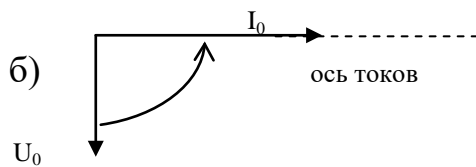
выводами, **течет переменный ток**. Установим связь между амплитудой колебаний напряжения на обкладках конденсатора и амплитудой колебаний силы тока. При изменениях напряжения на обкладках конденсатора по гармоническому закону

$$u = U_0 \cdot \sin \omega t \quad (3)$$

(рис. 2, а). **Конденсатор непрерывно перезаряжается, вследствие чего в цепи течет переменный ток**. Поскольку сопротивление подводящих проводов пренебрежимо мало, напряжение на



конденсаторе  $U_c = \frac{q}{C}$  можно считать равным внешнему напряжению  $U$ .



Тогда заряд конденсатора будет меняться по закону

$$q = C \cdot U = C \cdot U_0 \cdot \sin \omega t$$

Р и с. 2

Сила тока в цепи равна

$$I = \frac{dq}{dt} = C \cdot U_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t = C \cdot U_0 \cdot \omega \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

обозначим

$$C \cdot U_0 \cdot \omega = I_0 \quad (4)$$

и окончательно получим

$$i = I_0 \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

Из выражения (3) имеем

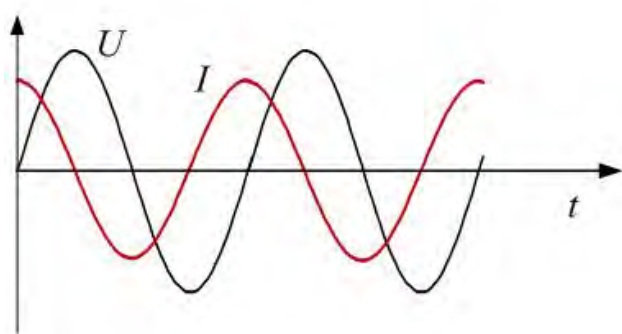


$$I_0 = \frac{U_0}{\frac{1}{\omega \cdot C}},$$

где величина

$$R_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

называется ЕМКОСТНЫМ сопротивлением. Сравнив выражения (1) и (5) находим, что ток, текущий через емкость, опережает напряжение по фазе на  $\varphi = -\frac{\pi}{2}$  (см. рис. 2, в, и векторную диаграмму рис. 2, б).



Р и с. 2, в

Причина отставания напряжения заключена в том, что *до тех пор, пока течет ток в одном и том же направлении, заряд на обкладках конденсатора растет. Сила тока проходит через максимум и начинает убывать, а заряд (следовательно и  $U_C$ ) все еще растет, достигая максимума в тот момент, когда ток обра-*

*щается в нуль. Вслед за тем ток изменяет направление и начинается убывание зарядов на обкладках* (рис. 2, в).

**Емкостное сопротивление конденсатора**, как и индуктивное сопротивление катушки, **не является постоянной величиной**. Оно обратно пропорционально частоте переменного тока. Поэтому амплитуда колебаний силы тока в цепи конденсатора при постоянной амплитуде колебаний напряжения на конденсаторе возрастает прямо пропорционально частоте.

**Емкостное сопротивление конденсатора**, как и индуктивное сопротивление катушки, называют **реактивным сопротивлением**.

Сдвиг фазы колебаний силы тока на  $\pi/2$  относительно фазы колебаний напряжения на конденсаторе приводит к тому, что мощность переменного тока на конденсаторе в течение одной чет-

верти периода имеет положительный знак, а в течение второй четверти – отрицательный.

**Среднее значение мощности переменного тока на конденсаторе за период оказывается равным нулю.**

**Физический смысл** этого результата заключается в том, что сначала за счет работы внешнего генератора происходит зарядка конденсатора и накопление энергии электрического поля, а затем за счет энергии электрического поля конденсатора создается электрический ток противоположного направления. **В результате работа электрического тока за период и средняя мощность равны нулю.**

### в) Индуктивное сопротивление в цепи переменного тока.

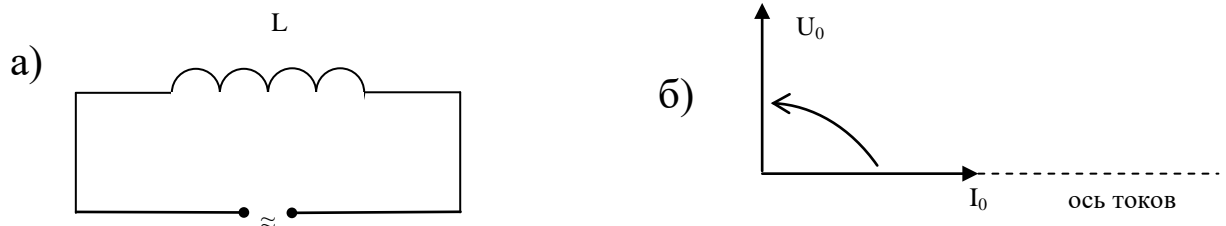
Подадим переменное напряжение  $U = U_0 \cdot \sin \omega t$  на концы катушки с индуктивностью  $L$  (рис. 3, а).

Через катушку потечет переменный ток.

$$i = I_0 \cdot \sin \omega t ,$$

вследствие чего в ней возникает электродвижущая сила самоиндукции

$$E_{Si} = -L \frac{dI}{dt} \quad (6)$$



Р и с. 3

Пренебрегая падением напряжения на малом омическом сопротивлении подводящих проводов и самой катушки, будем считать, что приложенное напряжение уравнивается электродвижущей силой самоиндукции  $E_{Si}$  (равно ей по величине и противоположно по направлению).

Тогда, учитывая формулы (6) и (2), можем написать

$$U = -E_{Si} = L \frac{dI}{dt} = L \cdot I_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t = U_0 \cdot \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

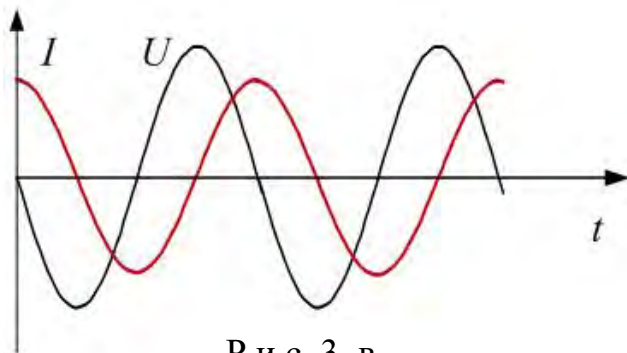
где

$$U_0 = I_0 \cdot \omega \cdot L, \quad \text{а} \quad I_0 = \frac{U_0}{\omega \cdot L} \quad (7)$$

Величина  $R_L = \omega L$  называется ИНДУКТИВНЫМ сопротивлением.

Сравнив формулы (2) и (7) находим, что ток  $I$ , текущий через индуктивность, отстает от напряжения  $U$  по фазе на

$\varphi = \frac{\pi}{2}$  (см. рис. 3, в и векторную диаграмму рис. 3, б).



Р и с. 3, в

Сдвиг фаз обусловлен тормозящим действием электродвижущей силы самоиндукции. Она препятствует изменению тока в цепи, поэтому максимум тока наступает позднее, чем максимум напряжения.

г) **Индуктивное, емкостное и омическое сопротивления в цепи переменного тока.**

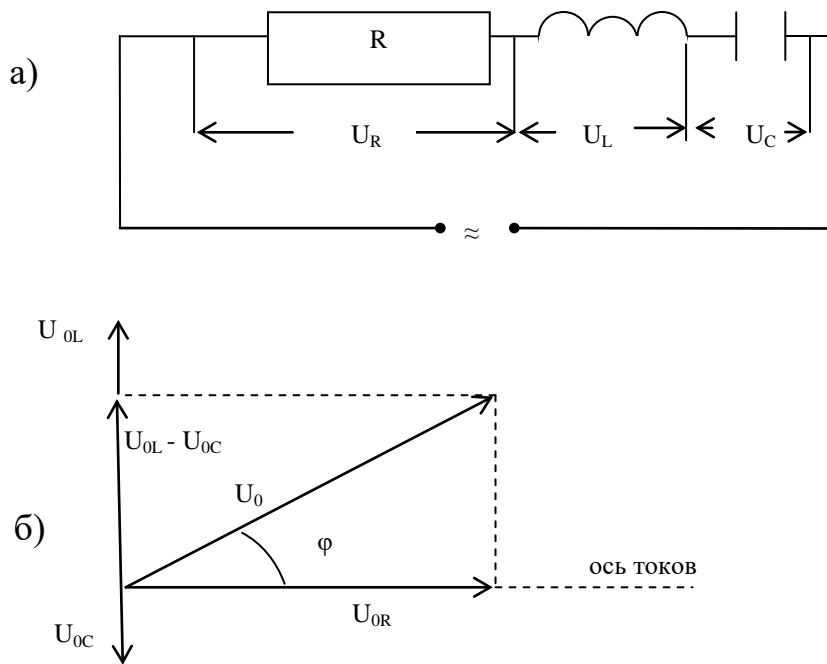
Подадим переменное напряжение  $U$  (формула 3) на концы цепи, состоящей из последовательно соединенных омического  $R$ , индуктивного  $R_L$  и емкостного  $R_C$  сопротивлений (рис. 4, а).

В цепи возникает ток той же частоты, амплитуда  $I_0$  и фаза которого определяются параметрами  $R, L, C$ .

Этот ток вызовет падение напряжения на сопротивлениях  $U_R$  – на активном,  $U_L$  – на индуктивном и  $U_C$  – на емкостном.

Векторная сумма этих напряжений должна равняться приложенному напряжению  $U_0$ , амплитудное значение которого равно

$$\vec{U}_0 = \vec{U}_{OR} + \vec{U}_{OL} + \vec{U}_{OC}.$$



Р и с. 4

Из векторной диаграммы (рис. 4, б) следует, что  $U_0$  образует с  $I_0$  угол  $\varphi$ , тангенс которого равен:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{0L} - U_{0C}}{U_{0R}} = \frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R_0} . \quad (8)$$

Угол  $\varphi$  дает разность фаз между  $U$  и  $I$ .

Из прямоугольного треугольника, гипотенуза которого  $U_0$ , находим, что

$$U_0^2 = (R \cdot I_0)^2 + I_0^2 \left[ \left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2 \right]$$

Откуда

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}} \quad (9)$$

Это **ОБОБЩЕННОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ЗАКОНА ОМА** для цепи переменного тока, в котором величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2} \quad (10)$$

представляет собой **ПОЛНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ** цепи.

Обычно **на практике** величину переменного тока и напряжения характеризуют не амплитудными значениями, а **действующими (эффективными)**:

$$I_{\text{эфф}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad U_{\text{эфф}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}},$$

В цепях переменного тока измерительные приборы (амперметры и вольтметры) показывают действующие значения.

Действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, при котором в проводнике выделяется такое же количество теплоты, что и при переменном токе за тот же промежуток времени.

Тогда в общем виде закон Ома для переменного тока запишется

$$I_{\text{эфф}} = \frac{U_{\text{эфф}}}{\sqrt{R^2 + \left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}} \quad (11)$$

В электрических цепях переменного тока при определенных условиях возникают явления электрического резонанса, при котором входное реактивное сопротивление цепи равно нулю.

При последовательном соединении элементов, обладающих индуктивностью  $L$  и емкостью  $C$ , возникает резонанс напряжений, а при параллельном – резонанс токов.

### **1. Последовательная цепь переменного тока.**

#### **Резонанс напряжений**

Напряжения на индуктивном и на емкостном сопротивлениях колеблются в противофазе и равны по модулю (поэтому

резонанс в последовательной цепи назван **резонансом напряжений**), следовательно, полностью компенсируют друг друга:

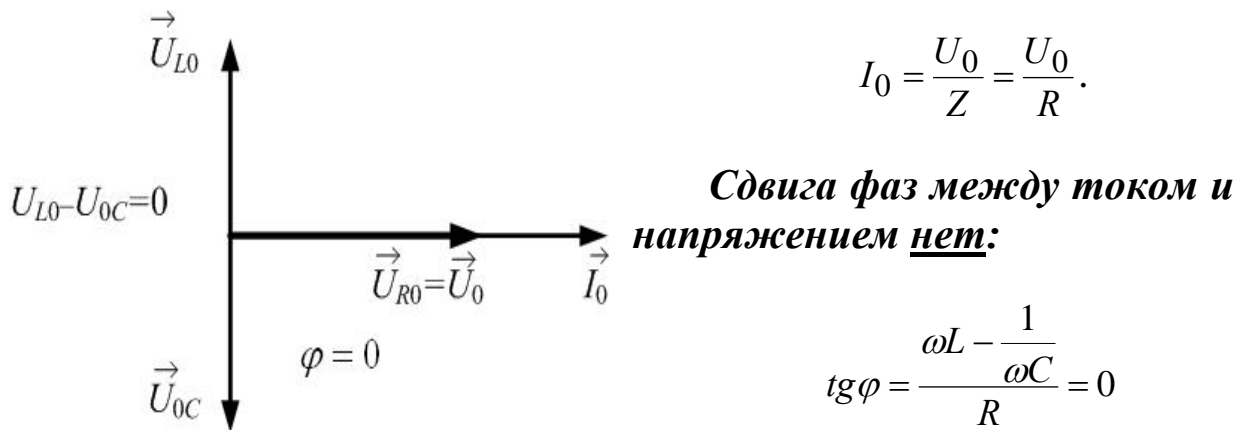
$$\vec{U}_{L0} + \vec{U}_{C0} = 0$$

$$\vec{U}_0 = \vec{U}_{R0}$$

Полное сопротивление минимально:

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

ток максимален и равен



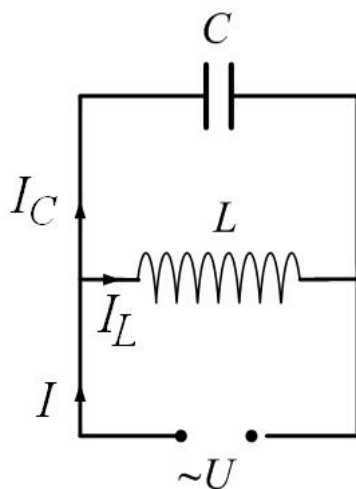
Р и с. 5

Векторная диаграмма при резонансе напряжений (рис. 5):

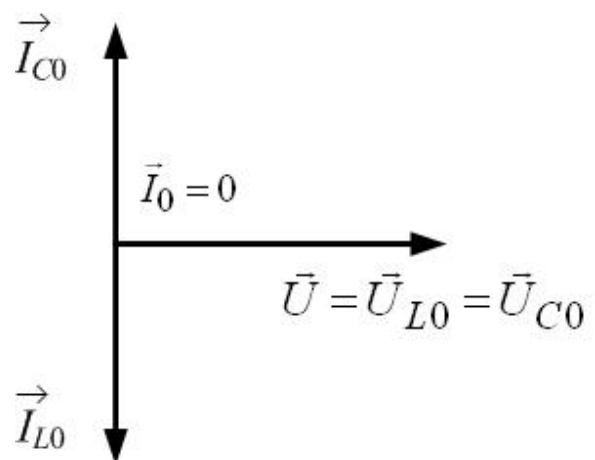
## 2. Параллельная цепь переменного тока.

### Резонанс токов.

Для простоты рассмотрим параллельную цепь без сопротив-



Р и с. 6



Р и с. 7

ления:  $R=0$  (рис. 6). Токи будем считать квазистационарными. По первому правилу Кирхгофа алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю. Токи складываем как векторы, длины которых равны соответствующим амплитудам:

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_{L0} + \vec{I}_{C0}$$

**Напряжения на емкости и индуктивности равны друг другу (цепь параллельная), и**

$$\vec{U}_0 = \vec{U}_{L0} = \vec{U}_{C0}$$

При резонансе

$$\omega L = \frac{1}{\omega \cdot C};$$

$$R_L = R_C.$$

**Тогда токи в обеих ветвях одинаковы по величине:**

$$I_{L0} = \frac{U_{L0}}{R_L} = \frac{U_0}{R_L}; \quad I_{C0} = \frac{U_{C0}}{R_C} = \frac{U_0}{R_C}$$

$$I_{L0} = I_{C0},$$

**но колеблются в противофазе (рис. 7). Они при сложении компенсируют друг друга, и общий ток равен нулю:**

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_{L0} + \vec{I}_{C0} = 0.$$

Это – резонанс токов.

**В отличие от резонанса напряжений резонанс токов – явление безопасное для электрической установки.**

Здесь нет ничего неожиданного, так как, чтобы создать большие реактивные токи, нужно подключить мощные реактивные катушки и большие батареи конденсаторов.

**Цели работы:** рассчитать коэффициент самоиндукции катушки, емкость конденсатора и проверить закон Ома для переменного тока.

## ***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ***

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА САМОИНДУКЦИИ, ЕМКОСТИ И ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

#### **ХОД РАБОТЫ**

**В процессе выполнения работы строго выполняйте правила техники безопасности!**

#### **А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ R.**

**ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:** катушка самоиндукции, амперметр, вольтметр, реостаты, блок постоянного и переменного тока.

1. Собрать цепь по схеме №1 с постоянным источником тока (клеммы «+» и «-»). В качестве амперметра используется цифровой прибор В7-22А. Для измерения силы тока используются гнезда «\*» и «I,R».

**ВНИМАНИЕ!** Подавать измеряемый ток на другие гнезда прибора В7-22А **ЗАПРЕЩАЕТСЯ**.

У катушки самоиндукции взять клеммы «0» (центральная) и «1» (1200 витков).

2. Подготовить установку к работе:
  - а) Ручку реостата поставить в крайнее левое положение.
  - б) У прибора В7-22А зафиксировать в утопленном состоянии клавиши «2000» и «mA». Сила тока индуцируется на табло в mA, при записи результатов перевести в A.
  - в) У вольтметра включить шкалу на 75 В. (Определить цену деления прибора).
3. С помощью реостата установить три различных значения тока величиной до 2-х ампер и снять соответствующие показания вольтметра.  
Данные занести в табл. 1.



Таблица 1

№ опыта	I, А	U, В	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>1 ср.</sub> , Ом
1				
2				
3				

где R<sub>1 ср.</sub> – среднее активное сопротивление первой катушки.

$$R_1 = \frac{U}{I}$$

4. Подключить у катушки самоиндукции клеммы «0» и «2» (2400 витков) и повторить действия пункта 3.

Данные занести в табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	I, А	U, В	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>2 ср.</sub> , Ом
1				
2				
3				

где R<sub>2 ср.</sub> – среднее активное сопротивление второй катушки.

### **Б. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА САМОИНДУКЦИИ.**

Для расчета коэффициента самоиндукции  $L$  нужно определить полное сопротивление цепи  $Z$  (состоит из активного  $R$  и индуктивного  $R_L$ ).

Для этого:

1. Собрать цепь по схеме №1, но с переменным источником тока (клеммы «~»). Для измерения силы переменного тока у амперметра (прибор В7-22А) зафиксировать в утопленном состоянии клавиши «2000», «~», и «mA».
2. Повторить действия пункта 3 первой части работы для клемм катушки индуктивности «0» и «1», затем для клемм «0» и «2». Данные занести в табл. 3 и 4.

Таблица 3

№ опыта	I, А	U, В	Z <sub>1</sub> , Ом	Z <sub>1 ср.</sub> , Ом
1				
2				
3				

где  $Z_{1cp.}$  – среднее значение полного сопротивления первой катушки.

$$Z_1 = \frac{U}{I}.$$

Таблица 4

№ опыта	I, А	U, В	Z <sub>2</sub> , Ом	Z <sub>2 ср.</sub> , Ом
1				
2				
3				

где  $Z_{2 ср.}$  – среднее значение полного сопротивления второй катушки.

3. Рассчитать коэффициент самоиндукции по формулам:

$$L_1 = \frac{\sqrt{(Z_{1cp.})^2 - (R_{1cp.})^2}}{\omega}$$

$$L_2 = \frac{\sqrt{(Z_{2cp.})^2 - (R_{2cp.})^2}}{\omega}$$

где  $L_1$  – коэффициент самоиндукции для первой катушки,

$L_2$  – коэффициент самоиндукции для второй катушки.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

### **В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА.**

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: конденсатор, амперметр, вольтметр, реостаты, блок постоянного и переменного тока.

Для определения емкости необходимо рассчитать сопротивление конденсатора. Для этого:

1. Собрать установку по схеме № 2.
2. Установить ручку реостата на «тах» сопротивление (влево до отказа).
3. Медленно вращая ручку реостата, установить любой по величине ток и измерить соответствующее значение напряжения. Показания амперметра и вольтметра занести в табл. 5.

Таблица 5

№ опыта	I, А	U, В	R <sub>c</sub> , Ом	R <sub>c ср.</sub> , Ом
1				
2				

где R<sub>c ср.</sub> – среднее значение емкостного сопротивления.

4. Рассчитать емкость по формуле:  $C = \frac{1}{\omega \cdot R_{c\text{ср.}}}$

#### Г. ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: катушка самоиндукции, конденсатор, амперметр, вольтметр, реостаты, блок постоянного и переменного тока.

Для проверки закона Ома для переменного тока нужно рассчитать полное сопротивление цепи ( состоит из активного R, индуктивного R<sub>L</sub> и емкостного R<sub>C</sub>).

Для этого:

1. Собирают цепь по схеме №3. У катушки самоиндукции взять клеммы «0» и «1».
2. Установить реостат на максимальное сопротивление (ручку влево до отказа).
3. Поворачивая ручку реостата, установить любой по величине ток, измерить соответствующее напряжение. Показания вольтметра и амперметра занести в табл. 6.

Таблица 6

№ опыта	I, А	U, В	Z <sub>1общ.</sub> , Ом	Z <sub>1общ. ср.</sub> , Ом
1				
2				

где Z<sub>1общ. ср.</sub> – полное сопротивление цепи (практическое).

4. Те же измерения выполнить для клемм катушки «0» и «2». Данные занести в табл. 7.

Таблица 7

№ опыта	I, А	U, В	Z <sub>2общ.</sub> , Ом	Z <sub>2общ. ср.</sub> , Ом
1				
2				

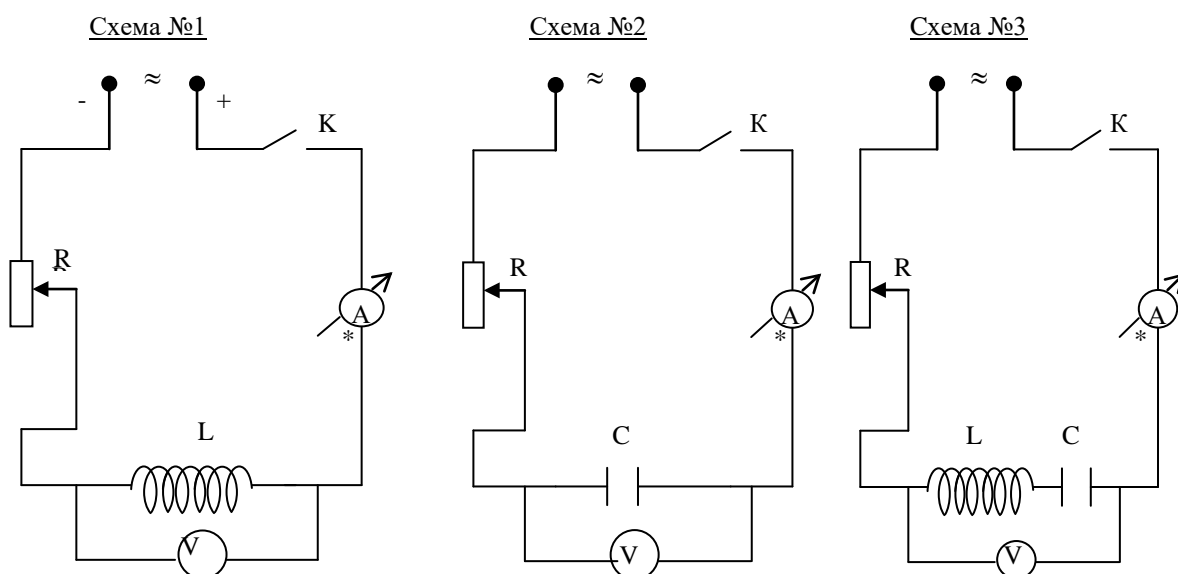
где Z<sub>2общ. ср.</sub> – полное сопротивление цепи (практическое).

5. Общее сопротивление цепи (теоретическое) рассчитать по формулам:

$$Z_1 = \sqrt{(R_{1cp.})^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

$$Z_2 = \sqrt{(R_{2cp.})^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

6. Полученные опытные и теоретические результаты сравнить с целью проверки справедливости формулы полного закона Ома для переменного тока. Записать окончательный результат и вывод.



**Вопросы для самопроверки:**

1. Что такое переменный ток?
2. Запишите закон изменения мгновенного значения переменного тока от времени.
3. Дайте определение действующего значения силы тока.
4. Как связано действующее значение силы тока (напряжения, ЭДС) с его амплитудным значением?
5. Какое сопротивление в цепи переменного тока называют активным?
6. Как влияет омическое сопротивление на сдвиг фаз между током и напряжением? От чего зависит и как рассчитывается омическое сопротивление?
7. Как ведет себя конденсатор в цепи постоянного тока?
8. Опишите работу конденсатора в цепи переменного тока.

9. Чему равно емкостное сопротивление конденсатора? От чего оно зависит? Как изменяется емкостное сопротивление конденсатора от частоты? Нарисуйте график зависимости  $R_c = f(\omega)$ .
10. Как влияет емкостное сопротивление на сдвиг фаз между током и напряжением? (показать графически  $(U = f(t), I = f(t))$  и векторную диаграмму).
11. Как ведет себя катушка в цепи переменного тока?
12. Почему при изменении силы тока в катушке в ней возникает ЭДС самоиндукции? В чем заключается явление самоиндукции?
13. Чему равно индуктивное сопротивление катушки?
14. Как изменяется индуктивное сопротивление катушки от частоты? Нарисуйте график зависимости  $R_c = f(\omega)$ .
15. Чему равна разность фаз между силой тока в катушке и напряжением на ней? (показать графически  $(U = f(t), I = f(t))$  и векторную диаграмму).
16. Почему напряжение опережает силу тока по фазе в случае индуктивного сопротивления и отстает от него на емкостном сопротивлении?
17. Почему индуктивное сопротивление катушки называют реактивным сопротивлением?
18. Чему равно полное сопротивление в цепи, содержащей последовательно соединенные емкостное, индуктивное и омическое сопротивления?
19. Изобразите векторную диаграмму напряжений в цепи переменного тока, содержащей последовательно соединенные емкостное, индуктивное и омическое сопротивления.
20. От чего зависит и как выражается угол сдвига фаз между током и напряжением в цепи переменного тока, содержащей последовательно соединенные емкостное, индуктивное и омическое сопротивления?
21. При каких условиях возникает резонанс напряжений, и в чем он заключается?
22. При каких условиях возникает резонанс токов, и в чем он заключается?

## Лабораторная работа 2

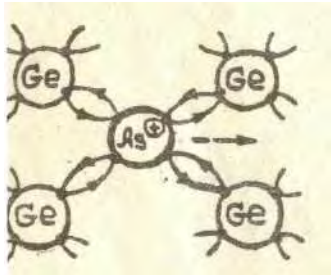
### ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ P-N-ПЕРЕХОДА

#### ТЕОРИЯ ЯВЛЕНИЯ

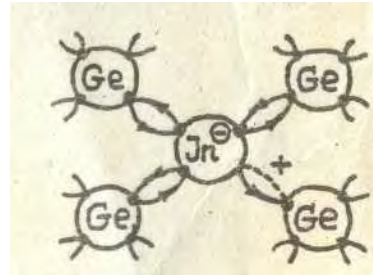
По своим электрическим свойствам полупроводники занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Типичными представителями полупроводников являются элементы IV группы таблицы Менделеева – германий и кремний.

Электропроводность ХИМИЧЕСКИ ЧИСТЫХ полупроводников, обусловленная направленным движением электронов и дырок, называется СОБСТВЕННОЙ. Концентрации свободных электронов и дырок в таком полупроводнике одинаковы.

Наличие даже небольшого количества примеси в полупроводнике оказывает большое влияние на его проводимость, создавая примесную проводимость полупроводника. Изменяя концентрацию и тип примеси, можно создавать полупроводники с преимущественной концентрацией электронов и дырок.



Р и с. 1



Р и с. 2

**Различают донорные и акцепторные примеси.**

Валентность атомов **донорной** примеси **больше** валентности основного полупроводника.

Например, если в кристалле германия один атом, имеющий четыре валентных электрона, заменить атомом пятивалентного элемента (фосфора, мышьяка), то четыре электрона примесного атома участвуют в образовании ковалентной связи, а пятый электрон оказывается «лишним». Он слабо связан со своим атомом и под влиянием теплового движения может покинуть атом и стать свободным. *Атом примеси при этом превращается в положительный ион* (рис. 1).

Примеси, легко отдающие электроны и, следовательно, увеличивающие число свободных электронов в полупроводнике, называют ДОНОРНЫМИ. *Полупроводник с донорной примесью называют полупроводником n-типа.* В таких полупроводниках преобладает электронный механизм проводимости, т.е. число свободных электронов резко возрастает, а число дырок не изменяется. Таким образом, электроны в таком полупроводнике являются основными носителями тока.

Валентность атомов *акцепторной* примеси меньше валентности **основного** полупроводника.

Если ввести в германий в качестве примеси трехвалентный элемент, например индий, то характер проводимости будет иным. Для образования ковалентной связи с соседними атомами германия атому индия не хватает одного электрона. Атом индия захватывает недостающий электрон у одного из атомов германия, *превращаясь при этом в отрицательный ион.* На месте ушедшего электрона образуется ДЫРКА (рис. 2).

Примеси, обогащающие полупроводник дырками, называют АКЦЕПТОРНЫМИ.

*Полупроводники с акцепторной примесью называют полупроводниками p-типа, в них основными носителями заряда являются дырки.* Таким образом, в полупроводнике **p-типа** имеет место дырочный механизм проводимости.

Рассмотрим явления, которые происходят при соприкосновении двух полупроводников. Наибольший практический интерес представляет контакт двух полупроводников с разными типами примесной проводимости. Этот контакт является основой работы полупроводниковых приборов.

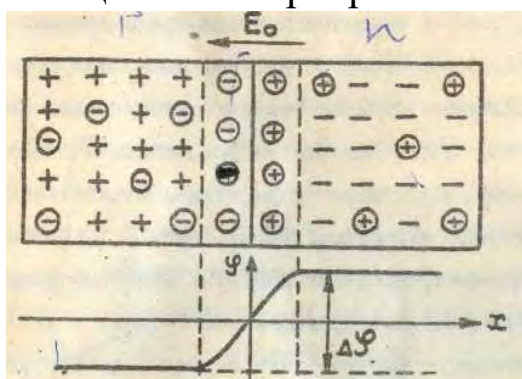
Обычно области различной проводимости полупроводника создают либо обработкой однородных монокристаллов, либо при выращивании монокристаллов. Так, если при выращивании монокристалла германия в расплавленный металл вводить необходимые примеси, то получается монокристалл, в котором имеются последовательно расположенные области с различным типом проводимости. В однородном монокристалле германия p-n-переход получается при местной термической обработке.

**Принцип работы большинства полупроводниковых приборов основан на специфических явлениях, возникающих на границе раздела полупроводников р- и n-типов.**

Рассмотрим механизм этих явлений на примере пластины, состоящей из двух слоев с различным типом проводимости.

**В n-области велика концентрация электронов, в р-области большая концентрация дырок (это основные носители заряда для данных областей). Вследствие разной концентрации электронов и дырок по обе стороны от границы раздела полупроводников часть электронов из приграничной области полупроводника n-типа диффундирует в р-область, а часть дырок из полупроводника р-типа диффундирует в n-область. Эти электроны и дырки встречаются с основными носителями и рекомбинируют. Таким образом, в приграничной области раздела двух полупроводников исчезают основные носители заряда.**

В результате этого на границе раздела двух полупроводников со стороны n-области остается не компенсированный электронами положительный заряд неподвижных ионов доноров. В свою очередь со стороны р-области остается не скомпенсированный дырками пространственный отрицательный заряд неподвижных ионов акцепторов (рис. 3). Величина напряженности электрического поля  $E_0$ , образованного ионами акцепторов и доноров вследствие обедненности приграничного слоя основными носителями заряда, оказывает сопротивление дальнейшей диффузии основных носителей и при некотором значении  $E_0$  движение основных носителей через границу прекращается. Разность потенциалов в приграничном слое достигает величины  $\Delta\phi$ , которая называется **величиной потенциального барьера.**



(Р и с. 3)

Двойной электрический слой образуется на границе раздела полупроводников с различным типом проводимости и называется р-n-переходом или запирающим слоем.

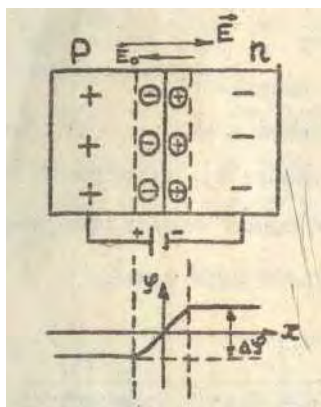
Запирающий слой – двойной слой разноименных электрических зарядов, создающий электрическое поле на р-n-переходе, препятствующее свободному разделению зарядов.



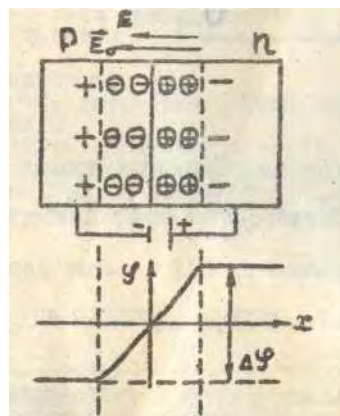
Если к свободным концам полупроводников р- и n-типов подключить внешний источник, то в зависимости от направления, поля источника, напряженность приграничного поля  $E_0$  и высота потенциального барьера  $\Delta\varphi$  для носителей тока будут изменяться.

#### Прямое включение р-п-перехода.

При соединении положительного полюса источника с р-областью, и отрицательного с n-областью внешнее поле ослабляет поле запирающего слоя, что способствует переходу через границу основных носителей. В этом случае высота потенциального барьера  $\Delta\varphi$  для основных носителей снижается и их диффузия через границу раздела двух полупроводников резко возрастает, а следовательно, возрастает и ток через р-п-переход (рис. 4, а). Такой ток называется прямым.



Р и с. 4, а



Р и с. 4, б

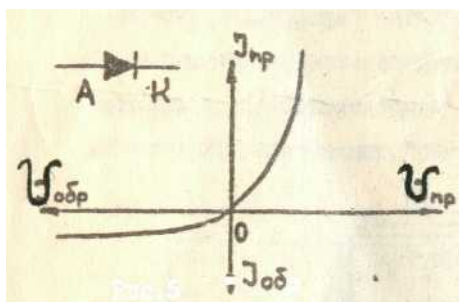
#### Обратное включение р-п-перехода.

При обратном включении р-п-перехода, когда с р-областью соединен минус источника электроэнергии, а с n-областью – плюс источника, внешнее поле  $E$  усиливает поле пространственных зарядов  $E_0$  на границе раздела и удаляет основные носители от границы. Высота потенциального барьера при этом возрастает и сопротивление запирающего слоя увеличивается (рис. 4, б). В этом случае перенос основных носителей через границу отсутствует, а имеет место лишь очень малый ток, обусловленный движением неосновных носителей заряда – обратный ток.

#### Полупроводниковый диод. Выпрямление переменного тока.

Таким образом, через р-п-переход может проходить электрический ток только одного направления.

Это свойство Р-п-перехода *используется в полупроводниковых диодах*, для которых задается вольтамперная характеристика, вид которой зависит от способа получения Р - п перехода, концентрации свободных электронов и дырок, конструкции диода и т.д. На рис. 5 приведено условное обозначение полупроводникового диода на схемах электрических цепей и его вольтамперная характеристика.



Р и с. 5

**Важным** параметром полупроводникового диода является **коэффициент выпрямления**, который определяют как отношение прямого тока  $I_{пр}$  к обратному току  $I_{об}$ , взятых при одинаковых напряжениях. В настоящее время широко применяют три вида полупроводниковых диодов: селеновые, германиевые и кремниевые.

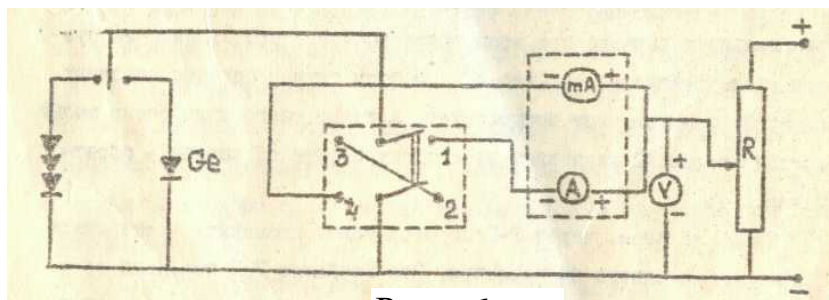
Полупроводниковые приборы обладают малыми габаритными размерами, высоким КПД и имеют длительный срок службы.

**ЦЕЛИ РАБОТЫ:** изучение свойств Р-п-перехода, снятие вольтамперной характеристики полупроводниковых диодов и расчет коэффициента выпрямления.

## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Р-N-ПЕРЕХОДА

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:** измерительный блок, селеновый выпрямитель и германиевый диод, осциллограф, блок питания. На рис. 6 дана электрическая схема для снятия вольтамперной характеристики, представляющая собой однополупериодную выпрямительную установку.



ХОД

Р и с. 6

РАБОТЫ

**В процессе выполнения работы**  
**строго выполняйте правила техники безопасности!**

**А. ПОЛУЧЕНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЛЕНОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ.**

1. Ознакомиться с электрической схемой установки, пределы измерения: у вольтметра  $V - 7,5$  В, у миллиамперметра  $mA_1 - 3$  мА, у миллиамперметра  $mA_2 - 750$  мА. Определить цену деления приборов.
2. Ключ  $K_1$  поставить в положение «1» (при этом подключается селеновый выпрямитель).
3. Движок реостата поставить в начальное положение (на себя), включить блок питания в сеть.
4. Установить ключ  $K_2$  в положение «1», задавая с помощью реостата значение прямого напряжения (в пределах от 0 до 1,6 В) по миллиамперметру  $mA_2$  определить значения прямого тока. Данные занести в табл. 1.

Таблица 1

Упр., В	0	0,4	0,8	1	1,2	1,6
Ипр., мА						

5. Вывести движок реостата в начальное положение; сменить направление тока, установив ключ  $K_2$  в положении «2». Задавая значение обратного напряжения (в пределах от 0 до 6,5 В) по миллиамперметру  $mA_1$  определить значение обратного тока. Данные записать в табл. 2.

Таблица 2

Uобр., В	0	1	2	3	4	5	6	6,5
Iобр., мА								

6. Отключить блок питания от сети, движок реостата установить на начальное положение, ключи  $K_1$  и  $K_2$  – в нейтральную позицию.

## Б. ПОЛУЧЕНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕРМАНИЕВОГО ДИОДА.

1. Ключ  $K_1$  установить в положение «2» (подключается германиевый диод).
2. Ключ  $K_2$  установить в положение «1», включить блок питания в сеть.
3. Задавая реостатом прямое напряжение (в пределах от 0 до 2 В) с помощью  $mA_2$  измерить значение прямого тока. Результаты занести в табл. 3.

Таблица 3

Упр., В	0	0,5	1	1,5	2
Ипр., mA					

4. Установить движок реостата в начальное положение, ключ  $K_2$  – в положение «2».
5. Задавая значение обратного напряжения (в пределах от 0 до 7 В), по  $mA_1$  определить значение обратного тока. Данные занести в табл. 4.

Таблица 4

Уобр., В	0	1	2	3	4	5	6	7
Иобр., mA								

6. Выключить схему из сети. Установить: движок реостата - в начальное положение, ключи  $K_1$  и  $K_2$  – в нейтральную позицию.

По данным таблиц 1, 2 и 3, 4 на одном рисунке построить графики зависимости тока от величины и направления приложенного напряжения для селевого выпрямителя и германиевого диода.

*Характеристики прямого и обратного направления наносятся на одной координатной сетке; прямые токи и напряжение считать положительными, обратные токи и напряжение – отрицательными.*

7. Рассчитать коэффициент выпрямления тока для селенового выпрямителя и германиевого диода:

$$K_{\text{выпр.}} = \frac{I_{\text{пр.}}}{I_{\text{обр.}}}$$

при  $U_{\text{пр.}} = U_{\text{обр.}} = 1 \text{ В}$ .

8. Сопоставить их электрические свойства. Записать окончательный результат и вывод.

**Вопросы для самопроверки:**

1. Какую проводимость полупроводников называют собственной?
2. Как осуществляется электронная и дырочная проводимости?
3. Какую проводимость полупроводников называют примесной?
4. Как получается полупроводник n-типа?
5. Как получается полупроводник p-типа?
6. Объясните, как возникает электронно-дырочный переход в отсутствии внешнего поля.
7. Какой слой называют запирающим? Как образуется запирающий слой в p-n-переходе?
8. Как влияет внешнее электрическое поле на свойства p-n-перехода?
9. Какое включение p-n-перехода называется прямым?
10. Какое включение p-n-перехода называется обратным?
11. Объясните ход вольт-амперной характеристики p-n-перехода.
12. Каким символом на электрических схемах изображается полупроводниковый диод?
13. Почему при больших обратных напряжениях на диоде величина его обратного тока резко возрастает?
14. Как изменяются свойства диодов с увеличением температуры?
15. Нарисовать принципиальную схему двухполупериодного выпрямителя.

## Лабораторная работа 3

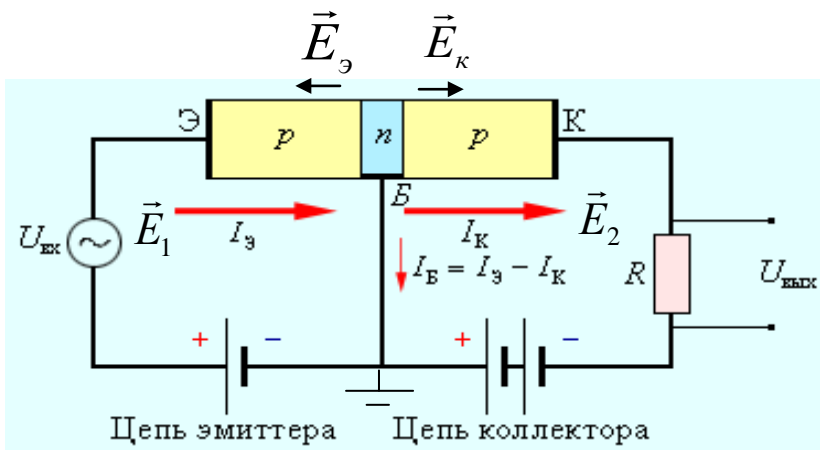
### СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТРИОДА

#### ТЕОРИЯ ЯВЛЕНИЯ

#### ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Транзисторы впервые были созданы в 1948 г.

Помимо диодов, в радиотехнике широкое распространение получили полупроводниковые триоды, или транзисторы. Полупроводниковый триод, или транзистор, представляет собой трехэлектродный полупроводниковый прибор, по характеристикам и значению сходный с усилительной лампой. В транзисторах имеется два р-п-перехода. Наиболее широкое распространение получили плоскостные транзисторы, состоящие из двух плоских р-п-переходов и имеющие структуру **р-п-р-** или **п-р-п-** типа. Принцип действия таких транзисторов одинаков. Различие состоит лишь в том, что в транзисторах **р-п-р-** типа основную роль играют **дырки**, в **п-р-п-** типа – **электроны**. Средняя часть транзистора называется **базой** и выполняет роль сетки, крайние пластины называются **эмиттером** и **коллектором**, причем эмиттер играет роль катода, а коллектор – анода (рис. 1).



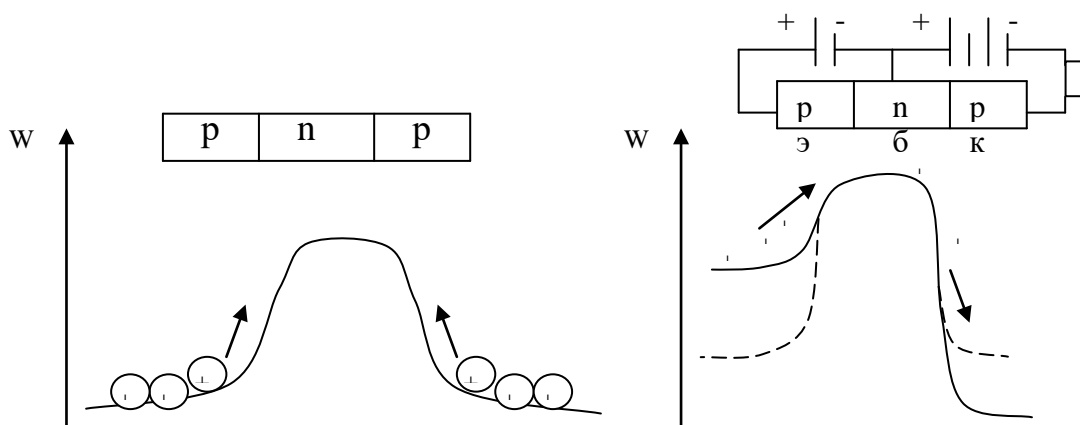
Р и с. 1

Это устройство позволяет осуществлять усиление электрического сигнала и может выполнять другие функции, для которых предназначен ламповый триод.

**Физические основы действия транзисторов** рассмотрим на примере транзистора **р-п-р-** типа. На один из р-п-переходов (**эмиттер – база**) **подается проходное напряжение** (левый переход на рис. 1), на второй переход (**база – коллектор**) **подается значительно большее запирающее напряжение** (правый край на рис. 1).

Это приводит к понижению потенциального барьера на первом переходе и повышению барьера на втором (рис. 2). Ток от эмиттера к базе, идущий в прямом направлении, создает инжекцию (впрыскивание дырок) в n-область (область базы). Последняя делается очень узкой (порядка  $10^{-5}$  м), при такой ширине n-области дырки **не успевают** рекомбинировать с электронами и достигают второго n-p-перехода. Здесь дырки захватываются приложенным к n-p-переходу ускоряющим напряжением  $U_2$  и проникают в коллектор уже в качестве основных носителей, участвуя в создании тока коллектора. Величина тока коллектора  $I_k$  оказывается очень близкой к току эмиттера  $I_э$ , т.к. число рекомбинировавших дырок в очень узкой базе не велико ( $I_k \approx I_э$ ). **Сопротивление же коллекторного перехода во много раз больше сопротивления эмиттерного перехода** ( $R_k \gg R_э$ ). Значит, по закону Ома ( $U = IR$ ) напряжение сигнала на выходе будет превышать напряжение на входе ( $U_{вых.} \gg U_{вх.}$ ). Таким образом, достигается эффект усиления по напряжению и по мощности ( $P = I U$ ).

Подобно электронной лампе, транзистор дает усиление и напряжения, и мощности, но в лампе анодный ток управляется сеточным напряжением, а в транзисторе ток коллектора, соответствующий анодному току лампы, управляется током эмиттера.



Р и с. 2

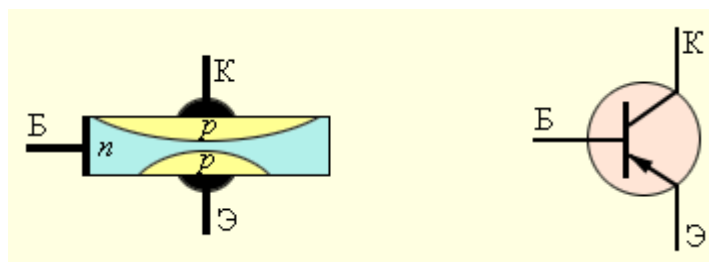
Энергетическая диаграмма для основных носителей (дырок) транзистора изображена на рис. 2.

При отсутствии внешнего поля потенциальная энергия дырок максимальна в n-области (рис. 2, а). При подаче на левый p-n-

переход (эмиттер – база) прямого напряжения (рис. 2, б) высота потенциального барьера снижается вследствие повышения энергии дырок в р-области (сплошная линия). Высота потенциального барьера правого n-p-перехода (база – коллектор) повышается вследствие понижения энергии дырок в р-области при подаче на нее отрицательного потенциала (сплошная линия).

Таким образом, дырки легко «перекатываются» через потенциальный барьер и попадают в правую р-область (коллектор). Все это может происходить в том случае, если база имеет малую толщину, которую дырки успевают пройти за время своей жизни. Аналогичный вид имеет диаграмма электронов.

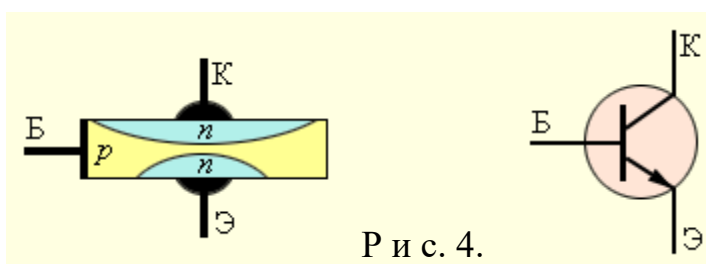
**В транзисторе р-п-р основными носителями заряда являются дырки**, движущиеся от эмиттера к коллектору. В этом же направлении протекает **ток** через эмиттер, т.е. **от эмиттера к коллектору**. Это учитывается в условном обозначении на схемах р-п-р-транзисторов, где стрелочка направлена от эмиттера к базе (см. рис. 3).



Р и с. 3

Аналогично в n-p-n-транзисторе основными *носителями заряда* являются **свободные электроны**, движущиеся от эмиттера к коллектору. Соответственно **ток**, за направление которого принимается движение положительных зарядов, **протекает от коллектора к эмиттеру**.

Поэтому на условном обозначении n-p-n-транзистора стрелка направлена от базы к эмиттеру (рис. 4).



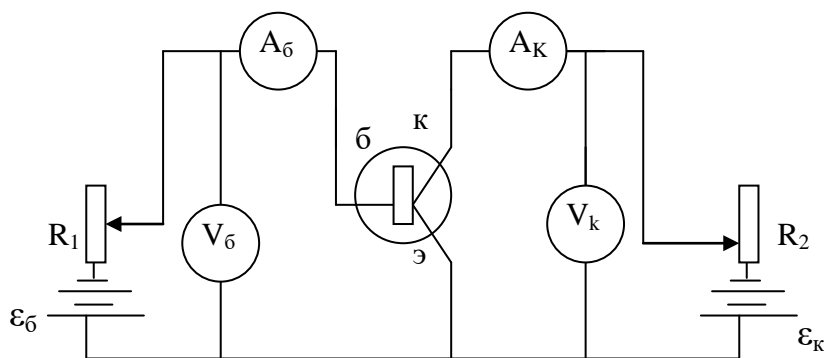
Р и с. 4.



**ЦЕЛИ РАБОТЫ:** снятие семейства выходных характеристик, передачи тока транзистора и определение коэффициента усиления по току.

### МЕТОД СНЯТИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИОДА

В данной работе используется электрическая схема включения транзистора не с общей базой, а с общим эмиттером (рис. 5). При таком включении транзистора достигается не только усиление по напряжению, но и по току.



Р и с. 5

ВЫХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА – зависимость коллекторного тока от коллекторного напряжения при

постоянном токе базы:  $I_k = f(U_k)$ , при  $I_{б} = \text{const}$ .

ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРЕДАЧИ ТОКА – зависимость тока коллектора от тока базы при постоянном коллекторном напряжении:  $I_k = f(I_{б})$ , при  $U_k = \text{const}$ .

**Основным параметром транзистора** является коэффициент усиления по току  $\alpha$  определяемый соотношением:

$$\alpha_1 = \left( \frac{\Delta I_k}{\Delta I_{б}} \right) \quad U_k = \text{const} \quad (1)$$

Он выражает отношение изменения тока коллектора к вызвавшему его изменению тока базы при постоянном напряжении на коллекторе.

Для снятия семейства выходных характеристик устанавливают с помощью реостата  $R_2$  различные значения напряжения  $U_k$  и измеряют ток коллектора, поддерживая реостатом  $R_1$  ток базы  $I_{б1}$  постоянным.

Изменив значение тока базы, снова снимают зависимость  $I_k=f(U_k)$  при  $I_{\delta 2}=\text{const}$ .

Результаты измерений представляют в виде графиков (рис.4).

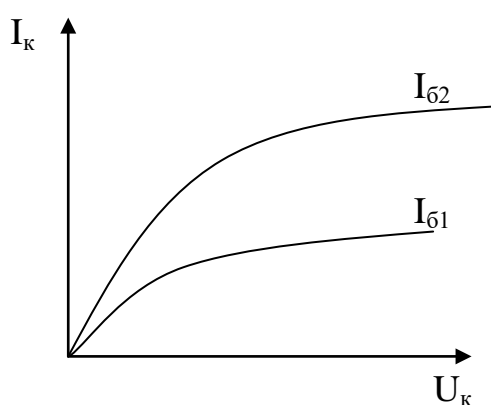
Для снятия семейства характеристик передачи тока используют ту же схему (рис. 5).

Изменяя реостатом  $R_1$  ток базы, измеряют ток коллектора при двух различных значениях напряжения на коллекторе:

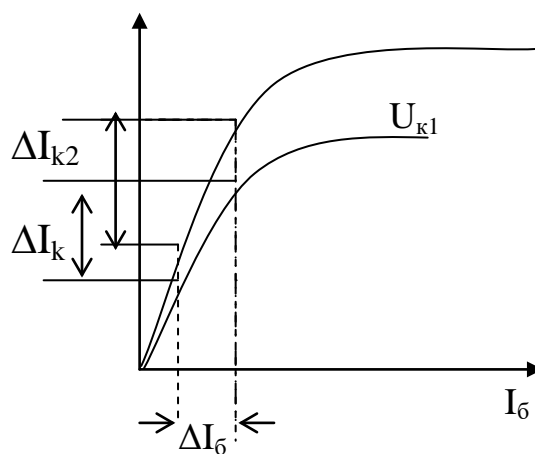
$$I_k=f(I_{\delta}), \quad \text{при } U_{k1}=\text{const},$$

$$I_k=f(I_{\delta}), \quad \text{при } U_{k2}=\text{const}.$$

Результаты измерений представляют в виде семейства характеристик передачи тока (рис. 6).



Р и с. 6



Р и с. 7

Пользуясь полученным графиком (рис. 7) находят  $I_{\delta}$ ,  $I_{k1}$ ,  $I_{k2}$ , затем в соответствии с формулой (1) определяют:

$$\alpha_1 = \left( \frac{\Delta I_k}{\Delta I_{\delta}} \right), \quad \text{при } U_{k1} = \text{const} \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \left( \frac{\Delta I_{k2}}{\Delta I_{\delta}} \right), \quad \text{при } U_{k2} = \text{const} \quad (3)$$

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

#### **В процессе выполнения работы**

**строго выполняйте правила техники безопасности!**

### А. СНЯТИЕ СЕМЕЙСТВА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: полупроводниковый триод, амперметры, вольтметры, реостаты, источник постоянного напряжения (выпрямитель).

1. Поставить движки реостатов  $R_1$  и  $R_2$  в ближнее к себе положение.
2. У «А<sub>б</sub>» должны быть включены клеммы «минус» и «7,5 мА», у «А<sub>к</sub>» – клеммы «минус» и «75 мА». Определить цену деления на этих приборах.
3. У вольтметра должны быть включены клеммы «минус» и «15 В». Определить цену деления на вольтметре.
4. Включить приборы в сеть переменного тока.
5. Установить при помощи реостата  $R_1$  определенное значение тока базы ( в пределах от 0 до 3 мА).
6. Поддерживая ток базы постоянным, задать с помощью реостата  $R_2$  различные значения напряжения на коллекторе (в пределах от 0 до 12 В), определяемые по вольтметру «U<sub>к</sub>» и определить при этих значениях ток коллектора  $I_k$  по амперметру «А<sub>к</sub>». Данные занести в табл. 1.
7. Повторить пункт 6 при другом значении тока базы.

Таблица 1

$I_b$ , мА	$U_k$ , В	0	1	2	3	4	5	...	12
	$I_{k1}$								
	$I_{k2}$								

8. По табличным данным построить графики

$$I_k = f(U_k) \text{ при } I_b = I_{b1}, I_b = I_{b2}.$$

9. Вернуть движки реостатов в исходное положение, выключить прибор из сети.

### Б. СНЯТИЕ СЕМЕЙСТВА ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕДАЧИ ТОКА.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: полупроводниковый триод, амперметры, вольтметры, реостаты, источник постоянного напряжения (выпрямитель).

1. Включить транзистор в сеть, установить с помощью реостата  $R_2$  определенное значение напряжения на коллекторе (в пределах от 0 до 5 В).
2. Поддерживая напряжение на коллекторе постоянным, изменять реостатом  $R_1$  ток базы (в пределах от 0 до 3,5 мА через 0,5 мА), измеряя при этом ток коллектора  $I_K$  по амперметру «А<sub>к</sub>». Данные занести в табл. 2.
3. Повторить действия пункта 2 при другом значении напряжения на коллекторе.

Таблица 2

$U_K, В$	$I_б, мА$	0	0,5	1	1,5	...	3,5
	$I_K$						
	$I_K$						

4. По данным таблицы построить графики:

$$I_K = f(I_б), \text{ при } U_K = U_{K1}, U_K = U_{K2}.$$

5. По графикам рассчитать коэффициент усиления триода по току, используя формулу

$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_б}, \text{ при } U_K = U_{K1}, U_K = U_{K2}$$

6. Сделать вывод об изменении коэффициента усиления по току в зависимости от напряжения на коллекторе.
7. Отключить приборы от сети переменного тока.
8. Записать окончательный результат и вывод.

**Вопросы для самопроверки:**

1. Какой полупроводниковый прибор называют транзистором?
2. Как устроен транзистор (n-p-n или p-n-p)?
3. Основные носители тока в транзисторе p-n-p.
4. Основные носители тока в транзисторе n-p-n.

5. Как называются основные части транзистора? Объясните назначение каждой из них?
6. Проведите аналогию устройства лампового триода и транзистора.
7. Как подключается внешний источник тока к первому переходу *эмиттер – база* и что при этом происходит?
8. Как подключается внешний источник тока к первому переходу *база – коллектор* и что при этом происходит?
9. Объяснить принцип усиления по напряжению, мощности полупроводниковым триодом. Нарисовать принципиальную схему включения транзистора.
10. Объяснить принцип усиления по току полупроводниковым триодом. Нарисовать принципиальные схемы включения транзистора.
11. Показать условное обозначение n-p-n-транзистора.
12. Показать условное обозначение p-n-p-транзистора.
13. В чем состоят преимущества полупроводникового триода перед ламповым?
14. Если транзистор выполнен совершенно симметрично, можно ли поменять местами эмиттер и коллектор?

## Лабораторная работа 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАМПЫ КАК УСИЛИТЕЛЯ

#### ТЕОРИЯ ЯВЛЕНИЯ

Для создания тока в вакууме необходим специальный источник заряженных частиц.

Действие такого источника основано на явлении термоэлектронной эмиссии.

Термоэлектронной эмиссией называется **испускание электронов нагретыми металлами.**

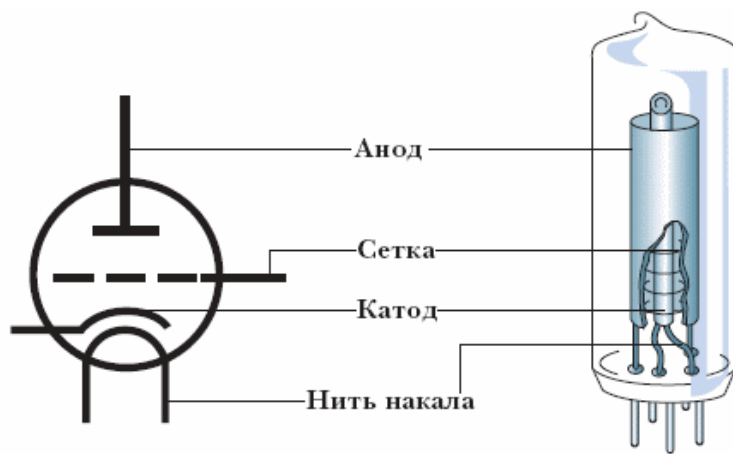
Явление термоэлектронной эмиссии объясняется тем, что в соответствии с законом распределения электронов по энергиям, при высоких температурах появляются электроны, кинетическая энергия  $W_k$  которых достаточна для того, чтобы преодолеть потенциальный барьер, имеющийся на границе металл – вакуум.

Таким образом, *условием вылета электронов из металла* является  $W_k \geq e\varphi$ , где произведение  $e\varphi$  – работа выхода электрона из металла.

**Явление термоэлектронной эмиссией лежит в основе работы электронных ламп.**

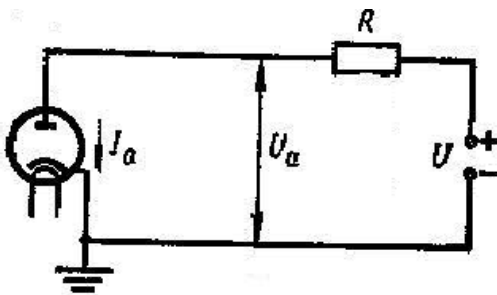
Рассмотрим устройство трехэлектродной электронной лампы.

Она представляет собой герметичный стеклянный баллон с тремя электродами: катодом – К, анодом – А и сеткой – С, внутри которого создан высокий вакуум.



Р и с. 1

В простейшем случае катод имеет форму тонкой нити, подогреваемой электрическим током, анод – коаксиального цилиндра, окружающего катод, сетка выполнена в виде спирали, обвивающейся вокруг катода (рис. 1). Изучение термоэлектронной эмиссии удобно вести с помощью схемы, изображенной на рис. 2.

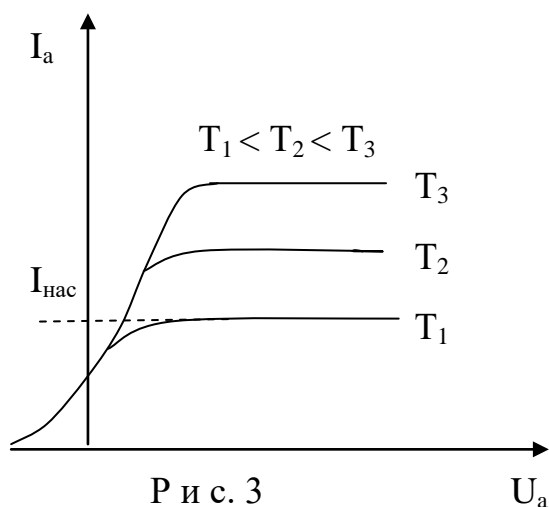


Р и с. 2

Основным элементом схемы (рис. 2) является двухэлектродная электронная лампа (диод).

Если установить постоянный накал катода и снять зависимость силы анодного тока  $I_a$  от анодного напряжения  $U_a$ , то получается кривая, изображенная на рис. 3 (различные кривые соответствуют различным температурам катода).

Эта кривая называется **вольт-амперной характеристикой**.



Р и с. 3

При  $U_a=0$  вылетевшие из катода электроны образуют вокруг него отрицательный пространственный заряд – электронное облако. Это облако отталкивает вылетевшие из катода электроны и большую часть их возвращает обратно.

Все же небольшому числу электронов удается долететь до анода, в результате чего в анодной цепи будет течь сла-

бый ток. Чтобы сделать анодный ток  $I_a=0$ , необходимо приложить между катодом и анодом некоторое отрицательное напряжение.

Следовательно, вольт-амперная характеристика начинается не в «нуле», а немного левее начала координат.

Анодный ток диода может быть увеличен двумя способами: путем повышения температуры катода и путем увеличения анодного напряжения.

При малых положительных значениях  $U_a$  зависимость  $I_a$  от анодного напряжения описывается формулой БОГУСЛАВСКОГО – ЛЕНГМЮРА (закон  $3/2$ ).

$$I_a = \alpha U^{3/2}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от формы и расположения электродов.

По мере роста  $U_a$  все большее число электронов отсасывается электрическим полем к аноду и при определенном значении  $U_a$  электронное облако полностью исчезает.

Все вылетевшие из катода электроны получают возможность достигнуть анода. При некотором значении анодного напряжения – ток достигает насыщения  $I_H$ .

**Током насыщения  $I_H$  называется максимальный термоэлектронный ток, возможный при данной температуре катода.**

Если в единицу времени с единицы поверхности катода вылетает  $N$  электронов, то плотность тока насыщения (сила тока насыщения, отнесенная к единице поверхности катода) будет равна

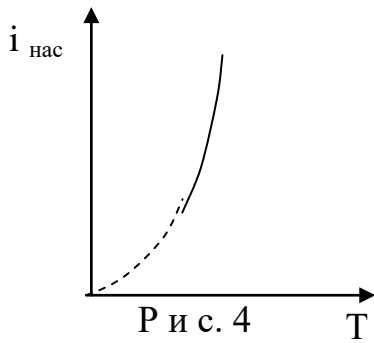
$$i_{\text{нас.}} = Ne.$$

Таким образом, измеряя плотность тока насыщения при различной силе тока накала, можно найти количество электронов, вылетающих с единицы поверхности при разных температурах.

Опыт показывает, что плотность тока насыщения возрастает с увеличением температуры (рис. 4).

Квантовая теория позволяет вычислить значения плотности тока насыщения:





Р и с. 4

$$i_{\text{нас.}} = VT^2 e^{\frac{-e\phi}{KT}}, \quad (2)$$

где  $e\phi$  – работа выхода электрона из металла,

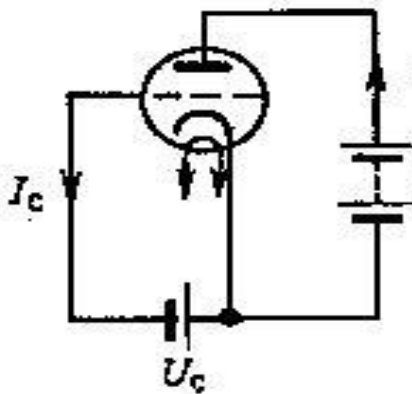
$K$  – постоянная Больцмана,

$T$  – абсолютная температура металла,

$V$  – не зависящая от рода металла константа. Формула (2) называется формулой РИЧАРДСОНА.

Как следует из выражения (2) уменьшение работы выхода резко повышает эмиссию. Поэтому при изготовлении электронных ламп применяют специальные покрытия и способы обработки катодов.

Современные катоды имеют работу выхода  $e\phi=1\text{эВ}$ . В таких лампах практически нельзя достигнуть насыщения, так как это требует больших напряжений, при которых катод разрушается.

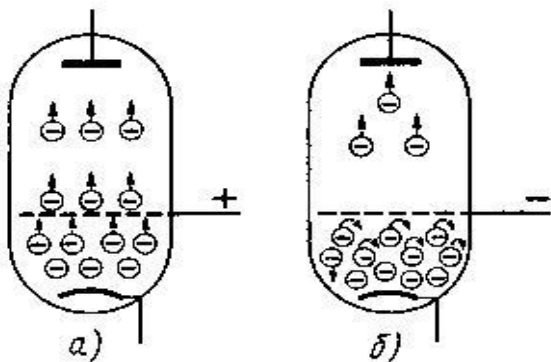


Р и с. 5

Анодным током **триода** можно управлять и посредством сетки.

Для этого триод включают в цепь по схеме, изображенной на рис. 5.

Если сообщить сетке небольшой положительный потенциал по отношению к катоду (рис. 6, а) то электроны будут быстрее отсасываться от катода и анодный ток будет расти. Из-за близости сетки к катоду небольшие изменения напряжения между сеткой и катодом оказывают большое влияние на силу анодного тока.

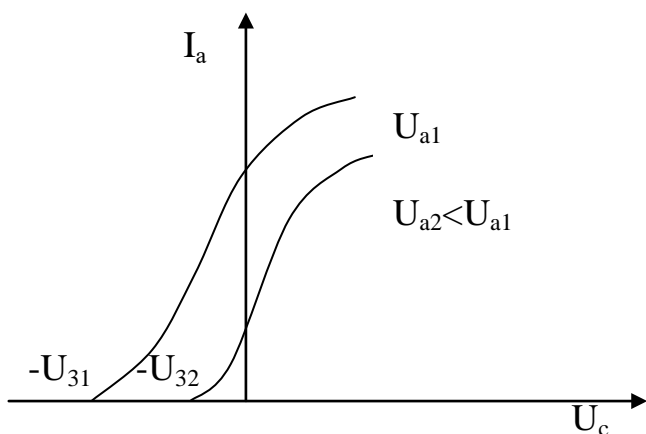


Р и с. 6

Отрицательное сеточное напряжение  $U_c$  уменьшает анодный ток (рис. 6, б).

Потенциал сетки, при котором анодный ток полностью прекращается, называется **потенциалом запирающей лампы**.

**Потенциал запирания лампы зависит от анодного напряжения  $U_a$** , чем оно больше, тем больший по абсолютной величине отрицательный потенциал следует создать на сетке, для того чтобы нейтрализовать основное электрическое поле и «запереть лампу». Если построить график зависимости анодного тока  $I_a$  от сеточного напряжения  $U_c$  при постоянных анодном напряжении  $U_a$  и токе накала  $I_n$  получаются кривые, изображенные на рис. 7 (различные кривые соответствуют различным анодным напряжениям). Эти кривые называется **сеточными характеристиками лампы**.



Р и с . 7

Подавая на сетку небольшое синусоидальное напряжение  $U_c$ , можно получить большие синусоидальные изменения анодного тока. При этом с сопротивления  $R$  может быть снято переменное напряжение с гораздо большей амплитудой, чем амплитуда  $U_c$ . На этом основано действие триода как усилителя. Кроме того, триод может быть использован для преобразования (изменения формы) и генерирования (возбуждения) переменных токов и напряжений.

**ЦЕЛИ РАБОТЫ:** изучение работы трехэлектродной электронной лампы и определение ее основных параметров.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

**ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:** стенд типа ЭС2, исследуемая лампа, осциллограф.

**В процессе выполнения работы строго выполняйте правила техники безопасности!**

### **ХОД РАБОТЫ**

1. Изучить работу триода в систематическом режиме. Снять семейство анодных характеристик триода:  $I_A = f(U_A)$ , при  $U_C = \text{const}$  и сеточных:  $I_A = f(U_C)$ , при  $U_A = \text{const}$ , для различных  $U_A$ .

2. Изучить работу триода в режиме одиночного каскада усилителя, снять характеристики  $U_{\text{вых.}} = f(U_{\text{входного}})$  и снять осциллограммы входного и выходного напряжения.
3. Питание стенда осуществляется от сети переменного тока (50 Гц, 127/220 В).

На передней панели стенда нанесены основные узлы принципиальной схемы.

**А) СНЯТИЕ СТАТИЧЕСКИХ АНОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИОДА.**

1. Подключить шнур питания стенда к сети переменного тока. Тумблером «СЕТЬ» включить стенд, при этом загорается лампочка сигнализации.
2. Тумблер  $B_1$  установить в положение «ТРИОД».
3. Тумблер «ИСТОЧНИК ВХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ» установить на постоянный ток (положение «-», «+»).
4. Тумблером  $B_6$  установить нагрузку анода 2,2 кОм.
5. Тумблером  $B_7$  установить катодное сопротивление 100 Ом.
6. Тумблер  $B_2$  поставить в положение «ВКЛ».
7. Тумблером  $B_8$  установить входное напряжение, подаваемое на сетку  $U_{c1}=1В$ .
8. Регулятором входного напряжения установить требуемое анодное напряжение от 0 до 200В (через 10В). При этом снимаются значение тока  $I_a$  через триод по миллиамперметру. Данные заносят в таблицу 1.
9. Тумблером  $B_{10}$  установить входное напряжение  $U_{c2} = 4В$ .
10. Повторить действия пункта 8.

Таблица 1

$U_c,$ В	$U_a,$ В	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	до 200
1	$I_{a1}$												
4	$I_{a2}$												

11. По данным таблицы построить график зависимости

$$I_a = f(U_a), \text{ для } U_c = U_{c1} \text{ и } U_c = U_{c2}$$

на общих осях координат.

## Б) СНЯТИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ АНОДНО-СЕТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

### ТРИОДА.

1. Тумблер  $V_8$  поставить в положение 0В.
2. Регулятором анодного напряжения установить напряжение на аноде  $U_{a1}=100В$ .
3. Тумблером  $V_8$  установить последовательно на сетке триода отрицательное напряжение от «0» до «max» через один вольт, снимая каждый раз показания миллиамперметра. Данные занести в табл. 2.
4. Регулятором анодного напряжения установить напряжение на аноде  $U_{a2}=200 В$ .
5. Повторить действие пункта 3.

Таблица 2

$U_a, В$	$-U_c, В$	0	1	2	3	4	5	6	и т.д.
100	$I_{a1}$								
200	$I_{a2}$								

6. По данным табл. 2 построить графики сеточных характеристик триода

$$I_a = f(U_c),$$

для  $U_a = U_{a1}$  и  $U_a = U_{a2}$

на общих осях координат.

7. Определить параметры лампы по формулам:

Внутреннее сопротивление  $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$  при  $U_c = \text{const}$ .

Крутизна сеточной характеристики  $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}$  при  $U_a = \text{const}$ .

Коэффициент усиления  $\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}$  при  $I_a = \text{const}$ .

8. Записать окончательный результат и вывод.

### **Вопросы для самопроверки:**

1. Какое физическое явление называется термоэлектронной эмиссией? Условие, при котором можно наблюдать явление термоэлектронной эмиссии?
2. Что называется работой выхода?
3. Какие электрические частицы могут создавать ток в вакууме?
4. Как устроен вакуумный диод и триод? Какую функцию выполняет каждый элемент триода. Каково основное назначение сетки в триоде?
5. Как работает вакуумный триод?
6. Начертите вольт-амперную характеристику и объясните ее особенности.
7. Какому физическому закону подчиняется работа триода?
8. По какой математической формуле можно вычислить плотность тока насыщения и от чего он зависит? Как можно изменить плотность тока насыщения?
9. Что такое сеточная характеристика лампы и от чего зависит ее вид?
10. Что такое потенциал лампы и от чего он зависит? Как можно повысить потенциал запирающей лампы?
11. Почему вакуумный диод обладает односторонней проводимостью?
12. Для чего применяется вакуумный диод и вакуумный триод?
13. Что показывают характеристики ламп? Объясните физический смысл параметров ламп.
14. Каким образом связаны между собой параметры трехэлектродной лампы?

## Лабораторная работа 5

### ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕРМОЭДС

#### ТЕОРИЯ ЯВЛЕНИЯ

При тесном соприкосновении (контакте) двух разнородных металлов между ними возникает разность потенциалов, называемая **контактной**. Величина контактной разности потенциалов не зависит ни от формы, ни от размера проводников и определяется лишь тем, какие металлы вступили в контакт и какова температура в месте их соединения.

**Возникновение контактной разности потенциалов** происходит вследствие двух причин:

- 1) разная работа выхода у разных металлов;
- 2) различная концентрация свободных электронов в металлах.

Свободные электроны в металле находятся в состоянии непрерывного беспорядочного движения. При обычных температурах они не могут покинуть металл. Это происходит потому, что электроны внутри металла обладают меньшей потенциальной энергией, чем вне металла: они находятся в «потенциальной яме».

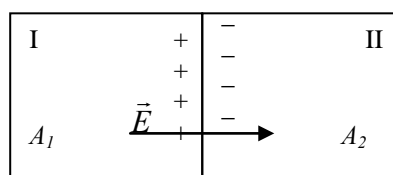
**Работа**, которую должен совершить электрон за счет своей кинетической энергии для того, чтобы вылететь из металла, называется **работой выхода**  $A_{\text{вых}}$  электрона из металла.

Она зависит от рода металла, чистоты поверхности и т.д. Работу выхода принято выражать в электрон-вольтах (эВ). Электрон-вольт равен работе перемещения электрона в электрическом поле между точками с разностью потенциалов 1 В:

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

**Концентрация** свободных электронов  $n$  – количество свободных электронов в единице объема проводника.

I. При контакте двух металлов с разной работой выхода (например,  $A_1 < A_2$ ), но с одинаковой концентрацией свободных



электронов ( $n_{01} = n_{02}$ ) происходит преимущественный перенос электронов из первого металла во второй, так как ме-

талл, имеющий меньшее значение работы выхода электронов, легче их теряет и заряжается положительно, а металл с большей работой выхода накапливает электроны и заряжается отрицательно (рис. 1).

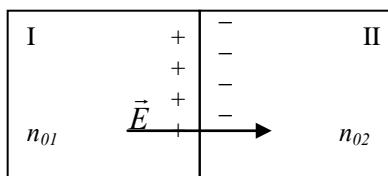
Возникшее при этом электрическое поле  $\vec{E}$  препятствует дальнейшему переходу электронов и совсем прекратит его, когда установится разность потенциалов:

$$U'_{12} = \frac{A_2 - A_1}{e} = -\frac{A_1 - A_2}{e}, \quad (1)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – работа выхода соответственно первого и второго металлов,

$e$  – заряд электрона.

Разность потенциалов  $U'_{12}$  называют **внешней контактной разностью потенциалов**.



Р и с. 2

II. При контакте двух металлов с **одинаковой работой выхода** ( $A_1=A_2$ ), но с **разной концентрацией свободных электронов** (например,  $n_{01}>n_{02}$ ) из первого металла будет выходить больше электронов, чем из второго (рис. 2).

*Преимущественный перенос электронов из первого металла во второй обусловлен явлением диффузии.*

**В результате** первый металл заряжается положительно, а второй – отрицательно и **на границе раздела** металлов возникнет разность потенциалов, которая прекратит дальнейшую перекачку электронов:

$$U''_{12} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}, \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,

$e$  – заряд электрона,

$n_{01}$  и  $n_{02}$  – концентрации свободных электронов соответственно в первом и втором металлах.

Разность потенциалов  $U''_{12}$  называют **внутренней контактной разностью потенциалов**.

III. В месте соединения разнородных металлов вследствие диффузии электронов возникает контактная разность потенциа-

лов, которая так же, как и контактные потенциалы этих металлов, зависит от работы выхода, концентрации электронов и температуры.

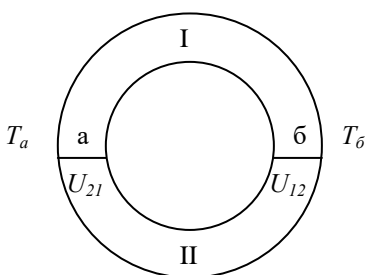
Суммарная контактная разность потенциалов  $U_{12}$ , обусловленная обеими причинами (разными работой выхода ( $A_1 \neq A_2$ ) и концентрацией свободных электронов ( $n_{01} \neq n_{02}$ )), согласно формулам (1) и (2), будет равна:

$$U_{12} = U'_{12} + U''_{12} = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \quad (3)$$

Зависимостью контактной разности потенциалов от температуры обусловлено явление **термоэлектрического эффекта**.

**Термоэлектричество** – это явление возникновения электрического тока в контакте разных металлов при условии создания разности температур спаев.

Рассмотрим замкнутую цепь, состоящую из двух разнородных металлов I и II. Эта цепь будет иметь два спая «а» и «б». Поэтому можно считать, что каждый спай обладает определенной электродвижущей силой, т.к. в одном спае электроны будут двигаться по часовой стрелке, а в другом – против. То их ЭДС направлены в противоположные стороны, а суммарная ЭДС всей цепи равна их разности.



Р и с. 3

Это положение, которое остается справедливым для цепей, составленных из любого количества разнородных металлов, вытекает из законов Вольта.

Согласно **первому закону Вольта** установлено, что при соединении двух различных металлов между ними возникает разность потенциалов, *зависящая только* от их химического состава и температуры.

**Второй закон Вольта гласит:** если составить цепь из последовательно соединенных металлических проводников, находящихся при одинаковой температуре, то разность потенциалов между концами цепи не зависит от химического состава промежуточных проводников. *Она равна контактной разности потенциа-*



лов, возникающей при непосредственном соединении крайних проводников.

Следовательно, согласно этим законам можно заключить, что при **равенстве температур всех спаев в замкнутой цепи**, состоящей из **различных металлов**, алгебраическая сумма контактных разностей потенциалов **равна нулю**  $U_{12} = U'_{12} + U''_{12} = 0$ .

Если температуры контактов «а» и «б» **разные**  $T_a \neq T_b$  (рис. 3), то в цепи появляется так называемая **термоэлектродвижущая сила**.

Согласно формуле (3) контактные разности потенциалов в горячем и холодном спае будут различны:  $U_{12} \neq U_{21}$ .

$$\text{Значит } U_{12} = U'_{12} + U''_{12} \neq 0.$$

Полную электродвижущую силу  $E$ , возникающую в замкнутой цепи и равную сумме скачков потенциалов, называют **термоэлектродвижущей силой** (термоЭДС):  $E = U_{12} + U_{21}$ .

Пользуясь формулой (3), получим

$$\begin{aligned} E &= \left( -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT_a}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \right) + \left( -\frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT_b}{e} \ln \frac{n_{02}}{n_{01}} \right) = \\ &= \frac{k}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} (T_a - T_b) \end{aligned}$$

или

$$E = E_0 (T_a - T_b), \quad (4)$$

где  $E_0 = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}$  – есть постоянная для данной пары металлов величина, называемая **удельной термоЭДС**.

**Удельная термоЭДС – это физическая величина, которая показывает, какая термоЭДС возникает в замкнутой цепи при разности температуры спаев равной 1 К.**

Единица измерения удельной термоЭДС – вольт на кельвин (В/К).

Из формулы (4) следует, **что термоэлектродвижущая сила прямо пропорциональна разности температур спаев.**

Устройство, состоящее из двух разнородных проводников, может быть использовано для измерения температуры.

**Замкнутая цепь, состоящая из двух разнородных проводников, создающая ток за счет различия температур контактов, называется термопарой.**

Термопара имеет два спая и состоит из двух различных (по химическому составу) металлических (полупроводниковых) проводов, сваренных своими концами. В термопаре подводимая внутренняя энергия превращается в электрическую.

КПД термопары низок из-за большой теплопроводности металлов (т.к. имеет большие потери энергии на поддержание разности температур), поэтому главным образом используются для измерения температур.

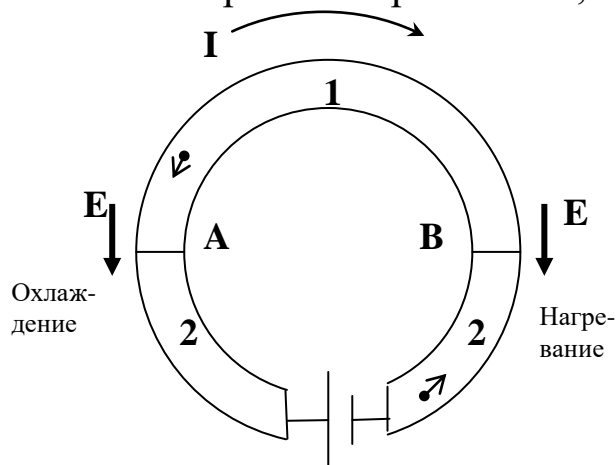
КПД полупроводниковых термопар, состоящих из двух разнородных полупроводников – выше (теплопроводность полупроводников ниже – потери меньше), поэтому их можно использовать как генератор.

**Явление Пельтье.**

В известном смысле обратным термоэлектрическому явлению оказывается явление *Пельтье*, обнаруженное в 1834 г.

**Оно заключается в том, что при пропускании электрического тока через цепь, состоящую из двух разных спаянных металлов (полупроводников), происходит не только их нагревание, вследствие выделения джоулевого тепла, но и дополнительное выделение тепла в одном из спаев, в то время как другой спай охлаждается (рис. 4).**

Если направление электрического тока совпадает с направлением термоэлектрического, возникающего при условии  $T_A > T_B$



Р и с. 4

(рис. 4), то происходит нагревание спая В и охлаждение спая А.

При изменении направления тока на обратное, спай В – охлаждается, спай А – нагревается. Явление Пельтье так же, как и появление термоЭДС (эффект Зеебека), связано с возникновением контактной разности потенциалов

на границе двух разных металлов (полупроводников).

Физическая сущность эффекта Пельтье заключается в следующем. Благодаря контактной разности потенциалов в спае А и В создаются контактные электрические поля с напряженностями  $\vec{E}$  (вектор  $\vec{E}$  направлен вниз).

Электрический ток в цепи направлен как показано на рис. 4 (от + к –), тогда электроны в спае В движутся против направления вектора напряженности контактного слоя, а в спае А – по направлению вектора напряженности контактного слоя.

Следовательно, в спае В поле ускоряет электроны. Кинетическая энергия электронов возрастает. При их столкновении с ионами металла они передают им свою энергию, повышая тем самым внутреннюю энергию спае. Поэтому спай В – нагревается. В спае А поле тормозит электроны, кинетическая энергия их уменьшается. При столкновении с ионами металла такие электроны получают от ионов энергию, тем самым понижают внутреннюю энергию спае и он охлаждается.

Если поменять направление тока в контактах, эффект будет обратным. Контакт А будет нагреваться, контакт В – охлаждаться. Опыт показывает, что теплота Пельтье пропорциональна количеству протекшего электричества  $Q = \Pi \cdot q = \Pi \cdot i \cdot t$ .

Коэффициент Пельтье  $\Pi$  зависит от рода проводников, образующих контакт. Его численное значение может быть от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  В.

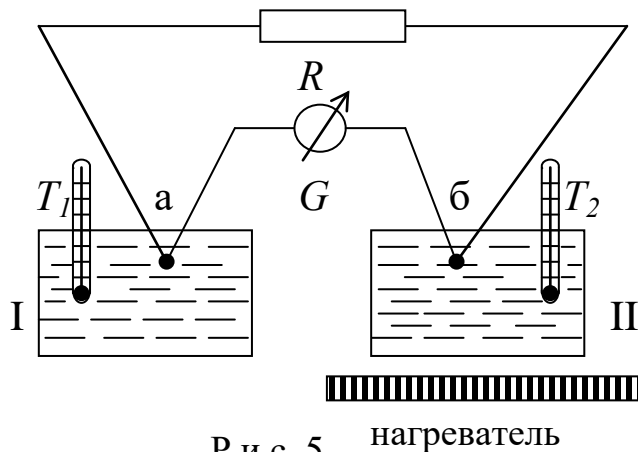
Явление Пельтье можно использовать для устройства холодильной машины, но эффективность крайне мала, поэтому более экономичными являются полупроводниковые холодильные устройства.

**Качественно явление Пельтье объясняется наличием контактной разности потенциалов. Если электрическое поле, создаваемое в спае контактной разностью потенциалов, ускоряет электроны, то в спае выделяется добавочное количество тепла, если поле задерживает электроны, то тепло поглощается.**

**ЦЕЛИ РАБОТЫ:** проградуировать термопару и определить ее удельную термоЭДС.

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

Для практического использования термопары ее необходимо проградуировать, т.е. экспериментально установить зависимость термоЭДС от разности температур спаев. Результаты градуировки изображаются в виде графика  $E=f(\Delta T)$ .



Р и с. 5 нагреватель

Экспериментальная установка (рис. 5) состоит из термопары и гальванометра. Спай «а» термопары помещён в сосуд с водой I, находящийся при постоянной температуре  $T_1$ . Спай «б» находится в сосуде с водой II, который будет нагреваться. В оба сосуда помещены термометры. При нагревании воды в сосуде II спай

«б» прогревают до температуры  $T_2$ . В цепи возникает ток  $I_1$ :

$$I_1 = \frac{E}{R_0} = i \cdot n_1, \quad (5)$$

где  $E$  – термоЭДС при разности температур  $\Delta T = T_2 - T_1$ ,

$R_0$  – сопротивление термопары и гальванометра,

$n_1$  – число делений на гальванометре, соответствующих температуре спая «б»  $T_2$ ,

$i$  – постоянная гальванометра по току.

Если, не изменяя температуры  $T_2$ , включить последовательно с гальванометром добавочное сопротивление  $R$  (рис. 5), то величина термотока будет другой –  $I_2$ :

$$I_2 = \frac{E}{R_0 + R} = i \cdot n_2, \quad (6)$$

где  $n_2$  – число делений на гальванометре, соответствующих температуре спая «б»  $T_2$ , но с включенным добавочным сопротивлением  $R$ .

Исключив из уравнений (5) и (6)  $R_0$ , получим:

$$E = i \frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 - n_2} \quad (7)$$

Подставив (7) в выражение (4), получим формулу для определения удельной термоЭДС:

$$E_0 = \frac{i \cdot R \cdot n_1 \cdot n_2}{(T_2 - T_1) \cdot (n_1 - n_2)} \quad (8)$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕРМОЭДС

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: термопара, гальванометр, нагревательный прибор, термометры, магазин сопротивлений, сосуды с водой.

#### ХОД РАБОТЫ

**В процессе выполнения работы строго выполняйте правила техники безопасности!**

#### **А. ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ.**

В данной работе градуируется термопара, состоящая из константана и меди.

1. Выключить внешнее сопротивление R (замкнуть клеммы 1-2 на магазине сопротивлений).
2. Добиться, чтобы температура в обоих сосудах была одинаковой и в цепи не было тока (стрелка микроамперметра находится на нуле).
3. Одну из колб (правую) нужно нагревать и фиксировать показания микроамперметра  $n_1$  через каждые  $10^\circ\text{C}$ . **Производить отсчет до  $100^\circ\text{C}$ .** Полученные данные записать в табл. 1.

Таблица 1

$t_1$	$t_2$	$t_2 - t_1$	$n_1$

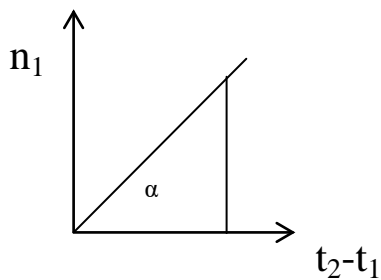
- 1)  $t_1$  – температура холодного спая.
- 2)  $t_2$  – температура нагретого спая.
4. При температуре  $100^\circ$  включить внешнее сопротивление R, последовательно замыкая клеммы 1-3 (1,8 Ом), 1-4 (3,6 Ом), 1-5 (7,2 Ом).

5. Полученные данные занести в табл. 2, они нужны для определения ЭДС термопары.

Таблица 2

R (Ом)	$n_2$
1,8	
3,6	
7,2	

6. Выключить внешнее сопротивление (замкнуть клеммы 1-2).
7. Построить график зависимости  $n_1 = f(\Delta t)$
8. Градуировочный коэффициент  $\gamma$ , т.е. зависимость возникающей в термопаре ЭДС от разности температур на ее спаях определяется по графику, как тангенс угла наклона графика к оси абсцисс.



$$\gamma = \frac{n_1}{t_2 - t_1} = \operatorname{tg}(\alpha)$$

**Б. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕРМОЭДС ТЕРМОПАРЫ.**

1. Удельная ЭДС термопары ( $E_0$ ) рассчитать три раза при различных значениях  $R$  и  $n_2$  по формуле

$$E_0 = \frac{i \cdot R \cdot n_1 \cdot n_2}{(T_2 - T_1) \cdot (n_1 - n_2)},$$

где  $n_1$  – берется при  $100^\circ\text{C}$ , без сопротивления ( $R=0$ ),  
 $t_2=100^\circ$ ,  
 $t_1$  – температура холодного спая.

2. По полученным данным найти  $E_{0 \text{ ср.}}$ ,  $\Delta E_{0 \text{ ср.}}$ .
3. Записать окончательный результат и вывод.

**Вопросы для самопроверки:**

1. В чем заключается явление термоэлектричества (эффект Зеебека).
2. Дайте понятие работы выхода. От чего она зависит?
3. Какими причинами обусловлена контактная разность потенциалов?
4. Как возникает внешняя разность потенциалов и чему она равна?
5. Как возникает внутренняя разность потенциалов и чему она равна?
6. Сформулируйте первый и второй законы Вольты.
7. Выведите формулу для термоЭДС.
8. Каков физический смысл удельной термоЭДС? От чего она зависит у металлов и полупроводников?
9. Что такое термопара?
10. Где находят применение термопары и термобатарей?
11. Что значит проградуировать термопару?
12. Физическая сущность эффекта Пельтье.
13. Объясните метод измерения, применяемый в данной работе.

## Лабораторная работа 6

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

#### ТЕОРИЯ ЯВЛЕНИЯ

##### а) Зависимость сопротивления металлов от температуры.

Сопротивление – основная электрическая характеристика вещества. Для однородного цилиндрического проводника длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $s$  сопротивление определяется по формуле:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала проводника – величина, зависящая от рода вещества и температуры.

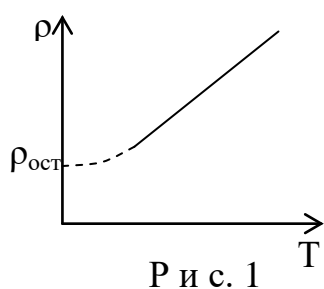
За единицу сопротивления принят  $1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/А}$ . Для металлов *удельное сопротивление возрастает с ростом температуры по линейному закону*

$$\rho_t = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (2)$$

где  $\rho_t$  и  $\rho_0$  – удельные сопротивления проводника при некоторой температуре  $t$  и при  $0^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, который измеряется в  $\text{K}^{-1}$  (Кельвин в минус первой степени).

**Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при нагревании его на один градус.**



$$\alpha = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0 \cdot t} \quad (3)$$

Для всех металлических проводников  $\alpha > 0$  и незначительно меняется с изменением температуры ( $\alpha \approx 10^{-4} - 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ).

Для электролитов  $\alpha < 0$ . В широкой области температур зависимость  $\rho(t)$  представляет собой прямую линию (рис. 1). В области очень низких температур при  $T \rightarrow 0$  сопротивление стремится к некоторой постоянной величине  $\rho_{\text{ост}}$ . остаточное, связанное с присутствием в



металле химических примесей, наличием дефектов в структуре кристаллической решетки.

Согласно представлениям *классической электронной теории проводимости металлов*, кристаллическая решетка металла образована положительными ионами, расположенными в узлах решетки, и свободными электронами. Свободные электроны хаотически движутся в металле, сталкиваясь с ионами. Таким образом, поведение свободных электронов подобно поведению молекул газа.

Поэтому совокупность свободных электронов можно рассматривать как своеобразный электронный газ.

*При создании электрического поля* возникает дополнительное (упорядоченное) движение электронов против направления поля. Таким образом, электрический ток в металлах обусловлен направленным движением свободных электронов.

*С позиции электронной теории* легко понять природу электрического сопротивления металлов и причину его зависимости от температуры.

**Сопротивление обусловлено** тем, что электроны при своем движении в токе испытывают столкновения с ионами кристаллической решетки металла. Эти столкновения тормозят упорядоченное движение электронов, играя роль своеобразной силы трения.

На характер движения электронов в проводнике влияет температура проводника. **С увеличением температуры концентрация электронов не меняется**, но **возрастает** средняя скорость беспорядочного движения свободных электронов и увеличивается амплитуда тепловых колебаний ионов (атомов) металла; это приводит к возрастанию числа столкновений электронов с частицами в узлах решетки – сопротивление проводника повышается (2).

При переходе к низким температурам (порядка  $1 \div 10\text{K}$ ) сопротивление некоторых металлов (например, олова, цинка, свинца, ртути) *резко падает почти до нуля*. Это явление называется **сверхпроводимостью**. Движение электронов в металле, находящемся в состоянии сверхпроводимости, приобретает высокую степень упорядоченности, при которой электроны перемещаются по проводнику, почти не испытывая соударений с атомами и ионами решетки.

Электронная теория не смогла дать полного объяснения явлению сверхпроводимости. Это удалось сделать лишь с помощью квантовой теории твердых тел.

б) Зависимость сопротивления полупроводников от температуры.

Зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры принципиально другая, чем у проводников.

**Удельное сопротивление полупроводников уменьшается при увеличении температуры.**

Полупроводниками являются элементы IV группы таблицы Менделеева, соединения III и V групп, оксиды и сернистые соединения металлов.

В кристаллической решетке полупроводника *каждый атом связан ковалентными (парноэлектронными) связями с соседними атомами*. Ковалентные связи достаточно прочны и при низких температурах не разрываются, поэтому *полупроводники при низких температурах не проводят электрический ток*.

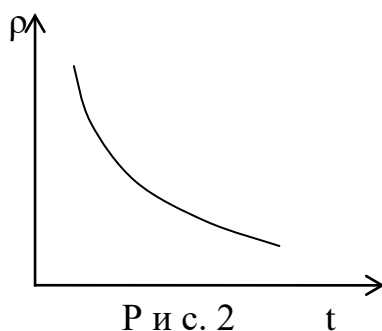
**При нагревании** полупроводника электроны получают энергию  $\Delta W$ , необходимую для разрыва связей и становятся свободными.

**При разрыве связи** образуется вакантное место с недостающим электроном (имеющее избыточный положительный заряд). Его называют дыркой.

*Положение дырки в кристалле все время изменяется, так как она может быть заполнена электроном, пришедшим от другого атома*. При этом новая дырка образуется в том месте, откуда оторвался электрон. Таким образом, *дырка может перемещаться по всему кристаллу*.

**При создании электрического поля** возникает упорядоченное перемещение как электронов, так и дырок, причем дырки перемещаются по направлению электрического поля, а электроны – против направления поля.

Таким образом, **полупроводники обладают электронно-дырочным механизмом проводимости.**



При **повышении температуры** количество носителей зарядов, появляющихся **попарно** (электрон – дырка), **увеличивается**, что **повышает проводимость** и соответственно **уменьшает удельное сопротивление полупроводника**.

Удельное сопротивление полупроводника изменяется с температурой по экспоненциальному закону (рис. 2)

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  – постоянная величина для данного полупроводника,

$\Delta W$  – энергия необходимая электрону для разрыва ковалентной связи (энергия активации),

$kT$  – величина, пропорциональная энергии теплового движения ( $k$  – постоянная Больцмана).

Рассмотренный нами процесс электропроводимости характерен для *собственной проводимости полупроводников*.

**ЦЕЛИ РАБОТЫ:** изучение температурной зависимости сопротивления металлов и полупроводников, вычисление температурных коэффициентов сопротивления металлов и полупроводников.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

### **ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

**ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:** универсальный цифровой вольтметр В7-22А, нагревательный прибор.

**ХОД РАБОТЫ**

### **В процессе выполнения работы строго выполняйте правила техники безопасности!**

В работе измерение сопротивлений осуществляется с помощью универсального цифрового вольтметра В7-22А. Перед включением прибора в сеть тумблер «Сеть» должен находиться в выключенном (левом) положении.

1. Ознакомиться с установкой.

2. Включить вольтметр В7-22А в сеть переменного тока (220 В), установить тумблер «Сеть» в правое положение. При этом должно зажечься световое табло.
3. Установить переключатель «Род работы» в положении «кΩ» (клавиша утоплена). Переключатель «Предел измерений» – в положении «2» (клавиша утоплена). При этом величина измеряемого сопротивления индицируется табло в килоомах (кОм).

**ВНИМАНИЕ! Трогать остальные рукоятки, кнопки и переключатели строго запрещается, т.к. это может привести к нарушению правильности работы прибора и его порче.**

4. Соединительные проводники должны быть соединены с клеммами «I,R» и «\*» на передней панели вольтметра В7-22А. Клемма «\*» на панели вольтметра должна быть соединена с клеммой «Земля» на распределительной колодке.
5. Тумблер на распределительной колодке установить в положении «Металл (проводник)». Показания термометра и прибора занести в таблицу.
6. Включить в измерительную цепь полупроводник, установив тумблер переключателя в положении «Полупроводник». Показания термометра и прибора занести в таблицу.
7. Включить электроплитку в сеть переменного тока и начать нагрев. Через каждые 10°С (до 100°С) повторять пункты 5 и 6. Результаты заносить в таблицу 1.

Таблица 1.

Проводник		Полупроводник				
t, °С	R, Ом	t, °С	T, К	1/T	R, Ом	ln R

8. Отключить электроплитку. Тумблер «Сеть» на вольтметре установить в левое положение, отключить вольтметр от сети переменного тока.
9. Построить для проводника график зависимости сопротивления от температуры  $R=f(t)$ , определить по графику  $R_0$  продолжив прямую до пересечения с осью ординат.
10. Рассчитать температурный коэффициент сопротивления для металла  $\alpha$  по формуле **три раза** для трех произвольных температур и найти среднюю величину  $\alpha_{cp}$ .

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}$$

11. Построить для полупроводника график зависимости сопротивления от температуры  $R=f(t)$ . Экстраполируя кривую до пересечения с осью ординат, определить  $R_0$ .
12. Рассчитать по формуле из пункта 10 температурный коэффициент сопротивления для полупроводника  $\alpha$  **три раза** для трех произвольных температур и найти среднюю величину  $\alpha_{\text{ср}}$ .
13. Построить график зависимости  $\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right)$  для полупроводника и вычислить энергию активации  $\Delta W$  по формуле:

$$\Delta W = 2k \cdot \text{tg} \alpha = \frac{2kT_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}$$

**Вопросы для самопроверки:**

1. Как объясняет теория наличие сопротивления у металлов?
2. Почему при увеличении температуры увеличивается число столкновений электронов с атомами кристаллической решетки проводника?
3. Как зависит удельное сопротивление проводника от температуры? В каких единицах измеряется температурный коэффициент сопротивления?
4. Чем можно объяснить линейную зависимость удельного сопротивления проводника от температуры?
5. Почему удельное сопротивление полупроводников уменьшается при увеличении температуры?
6. Опишите процесс собственной проводимости у полупроводников.
7. Показать графическую зависимость удельного сопротивления от температуры для металлов и полупроводников.
8. Изменяется ли температурный коэффициент сопротивления металла и полупроводника с изменением температуры?

## Лабораторная работа 7

### ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ ОМА И КИРХГОФА ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

#### ТЕОРИЯ ЯВЛЕНИЯ

При движении заряженных частиц в проводнике происходит перенос электрического заряда. Электрический ток возникает при **упорядоченном** перемещении **свободных носителей заряда**.

**Упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц называется электрическим током.**

Упорядоченное движение электрических зарядов в различного рода проводниках получило название *токов проводимости*.

Электрический ток имеет определенное направление. *За направление тока принимают направление движения положительных заряженных частиц.* (Выбор направления тока был сделан в то время, когда о свободных электронах в металлах еще ничего не знали.)

**О наличии электрического тока** приходится судить по тем действиям или явлениям, которые его сопровождают, к ним относятся тепловое (не наблюдается у сверхпроводников), магнитное, химическое (в растворах и расплавах электролитов), световое (лампы накаливания), механическое.

**Условия, необходимые для существования электрического тока.**

Для возникновения и существования постоянного электрического тока проводимости необходимы два условия:

1) наличие в данном проводнике **свободных заряженных частиц-носителей тока** (такими зарядами в металлах являются электроны проводимости, в электролитах – положительные и отрицательные ионы, в газах – электроны и ионы, в полупроводниках – электроны и дырки).

2) наличие **электрического поля внутри проводника**, т.е. *наличие постоянной разности потенциалов* на его концах, для поддержания которой существуют источники тока. Источник тока – устройство, разделяющее положительные и отрицательные заряды. В качестве источников тока используют гальванические

элементы, аккумуляторы, термоэлементы, электрические генераторы и т.д.

Упорядоченное движение электрических зарядов можно *осуществить и с помощью перемещающихся в пространстве заряженных тел*. Такой электрический ток называют **конвекционным**.

Если в цепи устанавливается электрический ток, то это означает, что через поперечное сечение проводника все время переносится электрический заряд. *Основная количественная характеристика электрического тока – сила тока. СИЛОЙ ТОКА ( $I$ ) называется скалярная физическая величина, численно равная электрическому заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени.*

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

где  $dq$  – заряд, переносимый за время  $dt$ .

Если численное значение силы тока и его направление не изменяются с течением времени, то ток называют **ПОСТОЯННЫМ**.

Сила тока **зависит от заряда**, переносимого каждой частицей, *концентрации* частиц, *скорости* их направленного движения и *площади* поперечного сечения проводника.

$$I = q \cdot n \cdot v \cdot S \quad (2)$$

**Основная** электрическая характеристика проводника – **сопротивление**. *От этой величины зависит сила тока в проводнике при заданном напряжении, но не наоборот*. Сопротивление проводника представляет собой как бы меру противодействия проводника установлению в нем электрического тока. **Единица измерения сопротивления – Ом**. *Проводник имеет сопротивление  $1$  Ом, если при разности потенциалов  $1$  В сила тока в нем  $1$  А.*

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

$$R = \rho \frac{l}{S} , \quad (3)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала,

$l$  – длина проводника,  
 $S$  – площадь поперечного сечения.

Удельное сопротивление – скалярная физическая величина, зависящая от рода вещества и его состояния (от температуры в первую очередь). Удельное сопротивление *численно* равно сопротивлению единичного проводника. т.е. проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>.

**Единица измерения удельного сопротивления – 1 Ом·м.**

Величина, обратная сопротивлению  $R$ , называется – *электрической проводимостью*  $G$ .

$$G = \frac{1}{R}. \quad (4)$$

Единица проводимости в СИ –  $\frac{1}{\text{Ом}} = \text{сименс}(\text{См})$  – проводимость проводника сопротивлением 1 Ом.

Величина, обратная сопротивлению  $\rho$ , называется – *удельной электропроводимостью*  $\gamma$ .

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (5)$$

Единица удельной проводимости в СИ – один сименс на метр, См/м.

***Законы постоянного тока.***

1. Законы Ома.

**1) Закон Ома для участка цепи**

$$I = \frac{U}{R}, \quad (6)$$

где  $U$  – разность потенциалов между концами однородного проводника (падение напряжения на участке цепи),

$R$  – электрическое сопротивление участка цепи.

**Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.**

Сопротивление участка проводника постоянно.

Для характеристики распределения электрического тока по сечению проводника вводится **вектор плотности тока**  $\vec{i}$ , числен-



но равный заряду, переносимому в единицу времени через единичную площадку, расположенную нормально направлению движения зарядов.

**Вектор  $\vec{i}$  направлен** в сторону движения положительных зарядов, его величина равна

$$|\vec{i}| = \frac{dq}{dt dS} \quad (7)$$

В случае однородного проводника постоянного сечения  $S$  величина плотности тока

$$|\vec{i}| = \frac{\mathbf{I}}{S} \quad (8)$$

Понятие о плотности тока позволяет дать иную формулировку закона Ома.

Подставляя выражение (3) в формулу (6), преобразуем закон Ома

$$\mathbf{I} = \frac{U}{R} = \frac{U \cdot S}{\rho \cdot l} \quad (9)$$

к виду

$$\frac{\mathbf{I}}{S} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{l}, \quad (10)$$

где  $\frac{U}{l} = E$  – напряженность электрического поля в проводнике,

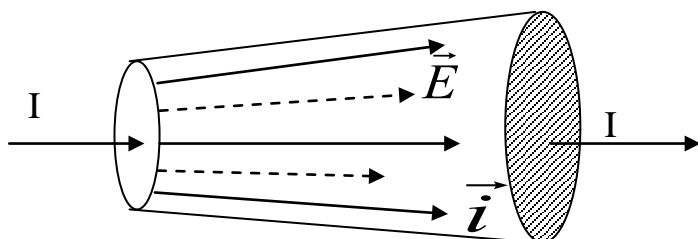
$\frac{1}{\rho} = \gamma$  – удельная электропроводность.

Носители заряда в каждой точке движутся в направлении вектора  $\vec{E}$ , поэтому направления векторов  $\vec{i}$  и  $\vec{E}$  совпадают.

Тогда выражение (8) примет вид

$$\vec{i} = \gamma \cdot \vec{E} \quad (11)$$

Формула (11) выражает закон Ома в дифференциальной форме.



Р и с. 1

Для проводников *переменного сечения* (рис. 1)

зависимость сопротивления от геометрических размеров уже **не будет** выражаться соотношением (3).

**Величина тока  $I$  в любых двух сечениях проводника будет одинаковой, иначе ток перестал бы быть постоянным. Плотность тока в различных сечениях и даже в разных точках одного и того же сечения может быть различной и по величине и по направлению, так как в этом случае внутри проводника будет неоднородным электрическое поле, вектор напряженности  $\vec{E}$  изменяет свою величину и направление от точки к точке.**

Однако соотношение (7) между векторами  $\vec{i}$  и  $\vec{E}$  остается справедливым в любой точке проводника.

### **2) Закон Ома для неоднородного участка цепи.**

Мы рассмотрели закон Ома для однородной цепи, т.е. такого, в котором не действует ЭДС (не действуют сторонние силы). Теперь рассмотрим неоднородный участок цепи, содержащий источник тока. **Закон Ома** для такого участка запишется в виде:

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

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – потенциалы начала и конца данного участка,  
 $R$  – сопротивление этого участка.

Для любого участка цепи  $I \cdot R = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon$

### **3) Закон Ома для замкнутой цепи.**

Если же электрическая цепь замкнута, то  $\Delta\varphi = 0$ , а сопротивление цепи равно сумме сопротивлений внешнего участка цепи  $R$  и внутреннего сопротивления источника тока  $r$ , то из (12) получим закон Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (13)$$

### **Закон Ома для замкнутой цепи:**

**сила тока в последовательной цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна суммарному сопротивлению цепи.**

$\varepsilon$  – электродвижущая сила источника тока, *равная работе, совершаемой сторонними силами (неэлектрического проис-*

хождения) внутри источника при перемещении между его полюсами единичного заряда.

Выражение  $\varepsilon = I \cdot R + I \cdot r$  – частный случай второго закона Кирхгофа, где  $U = I \cdot R$  – падение напряжения на внешней части цепи, а  $I \cdot r$  – падение напряжения на внутренней части цепи.

Следовательно  $\varepsilon > I \cdot R$  на величину  $I \cdot r$ .

Если цепь *разомкнута*, следовательно, в ней ток отсутствует, то из (13) получим, что  $\varepsilon = \varphi_2 - \varphi_1$ .

**Таким образом: ЭДС источника численно равна напряжению на его зажимах при разомкнутой внешней цепи.**

Следовательно, для того чтобы найти ЭДС источника тока, надо измерить разность потенциалов (напряжение) на его клеммах при разомкнутой внешней цепи.

**В пределе, когда  $R \rightarrow 0$ , источник тока замкнут *накоротко*.**

В этом случае ток максимален:  $I = \frac{\varepsilon}{r} = I_{\max}$ ,

а напряжение во внешней цепи  $U=0$ . Если  $R \rightarrow \infty$ , цепь *разомкнута* и ток отсутствует, а напряжение максимально и равно ЭДС источника.

$$U = I \cdot R = \frac{\varepsilon}{R + r} R = \varepsilon \frac{1}{1 + \frac{r}{R}} = \varepsilon \quad (14)$$

Обобщенный закон Ома, выражаемый формулой (12), позволяет рассчитать любую сложную цепь.

2. При прохождении тока по проводнику он нагревается. Согласно закону Джоуля – Ленца количество теплоты  $Q$ , выделяющееся в проводнике за время  $t$  пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника  $R$  и промежутку времени

$$Q = I^2 R t = I U t = \frac{U^2}{R} t. \quad (15)$$

Физическая величина  $w$ , измеряемая количеством тепла, выделяемым в единицу времени в единице объема проводника называется **плотностью тепловой мощности**:

$$w = \frac{Q}{St\Delta l}, \quad (16)$$

где  $\Delta l$  – длина цилиндрического проводника с током,  
 $S$  – площадь его поперечного сечения.

Воспользовавшись представлениями о плотности тока  $i$  и плотности тепловой мощности  $w$  можно записать закон Джоуля – Ленца в другой форме:

$$w = \frac{Q}{St\Delta l} = \frac{I^2 R}{S\Delta l}$$

или т.к.  $R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{\gamma} \frac{l}{S}$  и  $I = \frac{I}{S}$ , то  $w = \frac{1}{\gamma} i^2$ , но  $i = \gamma E$ .

Следовательно

$$w = \gamma E^2 \quad (17)$$

Формула (17) выражает **закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме.**

Плотность тепловой мощности пропорциональна квадрату напряженности электрического поля и удельной проводимости проводника.

### 3. Закон Видемана – Франца:

$$\frac{\chi}{\gamma} = \frac{3k^2}{e^2} T, \quad \frac{\chi}{\gamma} = \beta T, \quad (18)$$

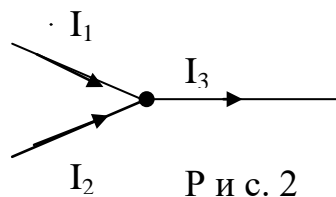
где  $\frac{3k^2}{e^2} = \beta = \text{const}$  ( $k$  – постоянная Больцмана,  $e$  – заряд электрона,  $\chi$  – коэффициент теплопроводности  $\frac{1}{2} n_0 k u \lambda$ ).

**Отношение коэффициента теплопроводности к коэффициенту электропроводности пропорционально абсолютной температуре металла и не зависит от сорта металла.**

**Расчет разветвленных цепей** значительно упрощается, если пользоваться правилами, сформулированными Кирхгофом. Этих

правил два. Первое из них относится к узлам цепи. УЗЛОМ называется точка, в которой сходится три или более проводника (рис. 2).

Токи, подходящие к узлу, считаются положительными, а токи, отходящие от него отрицательными.



ПЕРВОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА гласит: **алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю.**

$$\sum_K I_K = 0. \quad (19)$$

Справедливость этого утверждения вытекает из условия постоянства тока в цепи, согласно которому, в случае установившегося постоянного тока ни в одной точке проводника и ни на одном его участке не должны накапливаться электрические заряды.

ВТОРОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА является обобщением закона Ома на разветвленные электрические цепи.

Оно гласит, что **в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма падений напряжения  $I_K \cdot R_K$  равна алгебраической сумме электродвижущих сил, включенных в данный контур:**

$$\sum_K I_K \cdot R_K = \sum_i \mathcal{E}_i. \quad (20)$$

#### МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПО ПРАВИЛАМ КИРХГОФА.

**При составлении уравнений (19) и (20) по методу Кирхгофа необходимо руководствоваться следующими правилами:**

1. *Произвольно выбираем направление токов* на участках цепи. Токи считаем положительными, если они подтекают к узлу, а токи, оттекающие от узла, – отрицательными.

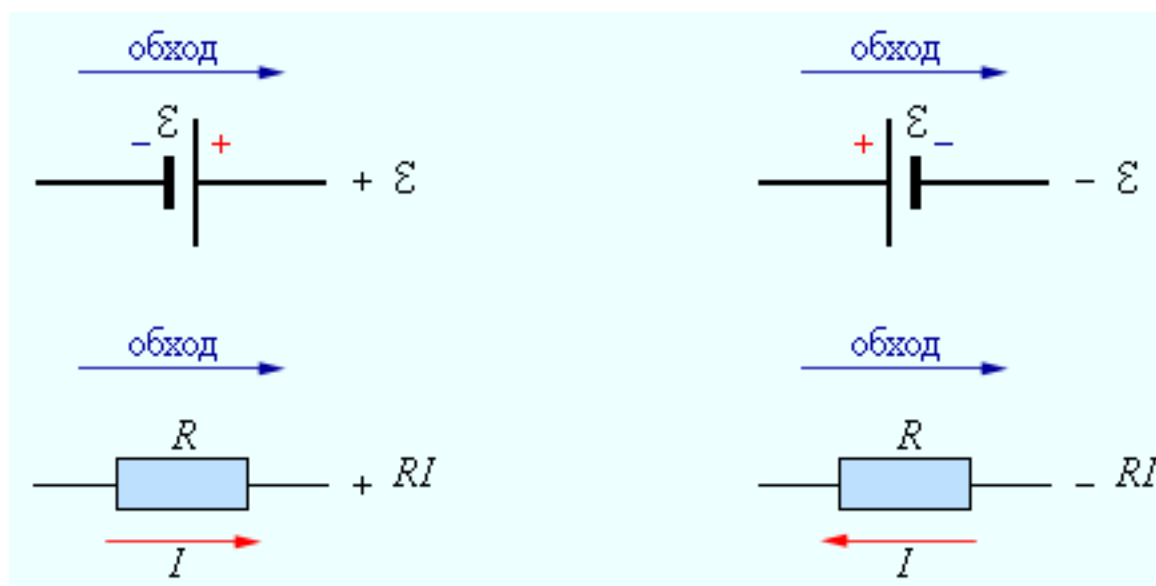
2. **Считаем число узлов.** Число независимых уравнений, составленных согласно 1-му правилу Кирхгофа, должно быть на одно меньше, чем число узлов.

3. **Произвольно выбираем направление обхода** независимых контуров. Контур считается независимым, если в нем есть участок цепи, который не рассматривался в предыдущих контурах.

4. **Если** выбранное направление обхода контура совпадает с выбранным направлением тока на данном участке, то падение напряжения  $I_i R_i$  берется со знаком плюс, а если не совпадает, то со знаком минус (рис 5, б).

5. **ЭДС, которые** повышают потенциал в направлении обхода контура, считаются *положительными*, а те, которые *понижают* – *отрицательными* (рис. 3, а).

6. Уравнений по 2-му правилу Кирхгофа надо составить столько, сколько независимых контуров в данной цепи.



Р и с. 3, а, б

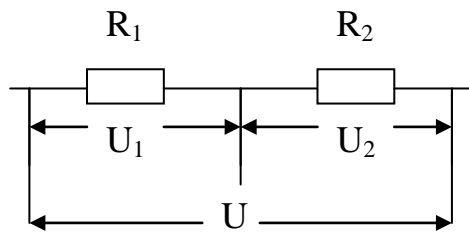
**ЦЕЛИ РАБОТЫ:** определение сопротивлений одиночных проводников, проверка законов последовательного и параллельного соединений проводников, применение законов Кирхгофа для расчета сложных электрических цепей.

**А) МЕТОД ПРОВЕРКИ ЗАКОНОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ.**

Различают последовательное и параллельное соединение проводников.

### 1. Последовательное соединение

При последовательном соединении двух сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 4)



Р и с. 4

А) **Общее напряжение цепи равно сумме напряжений на каждом проводнике**

$$U = U_1 + U_2$$

Б) **Сила тока  $I$  на всех участках цепи одинакова.**

$$I_1 = I_2 = \text{const.}$$

В) Тогда по закону Ома

$$IR = IR_1 + IR_2$$

Откуда следует  $R = R_1 + R_2$  (21)

Если последовательно включено  $n$  сопротивлений, то **полное сопротивление будет равно сумме их сопротивлений.**

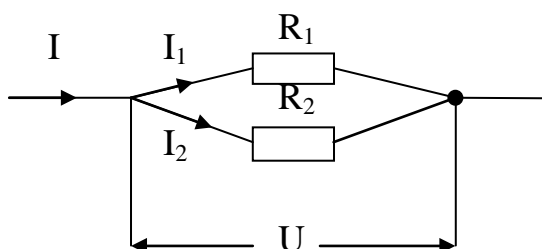
$$R = \sum_{K=1}^n R_K .$$

При последовательном соединении проводников ( $I = \text{const}$ ) мощность, выделяемая в проводниках, пропорциональна их сопротивлению

$$P = I^2 \cdot R.$$

2. **Параллельное соединение.** При параллельном соединении двух сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 5):

А) **Сила тока в неразветвленной части цепи  $I$  равна сумме сил токов  $I_1$  и  $I_2$  в ветвях разветвления.**



$$I = I_1 + I_2$$

Р и с. 5

**Б) Падение напряжения на всех участках одинаково.**

$$U=U_1=U_2$$

**В) По закону Ома**

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

откуда следует:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} . \quad (22)$$

Если параллельно включены  $n$  сопротивлений, то полное сопротивление разветвления найдется из соотношения

$$\frac{1}{R} = \sum_{K=1}^n \frac{1}{R_K} .$$

***Сопротивление параллельного соединения проводников меньше сопротивления любого из них.***

*При параллельном соединении проводников ( $U = const$ ) мощность, выделяемая в проводниках, обратно пропорциональна их сопротивлению.*

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Для проверки соотношений (21) и (22) измеряют падение напряжения на каждом сопротивлении и силу тока в нем. По закону Ома рассчитывают сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ . Затем измеряют падение напряжения на всем участке при последовательном и параллельном включении сопротивлений и токи в ветвях разветвления и неразветвленной части цепи. По закону Ома рассчитывают полное сопротивление участка  $R$ .

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ ОМА И КИРХГОФА ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

**ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:** амперметры, вольтметр, реостат, источники постоянного тока, набор сопротивлений, выключатели, соединительные провода.

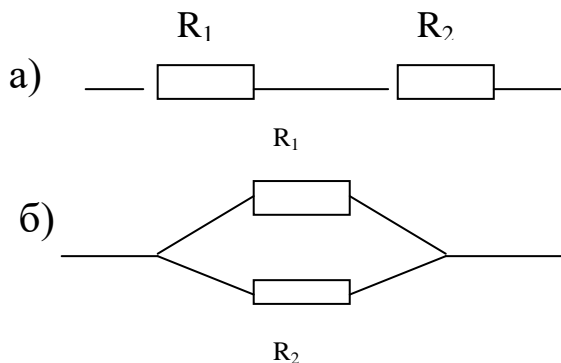
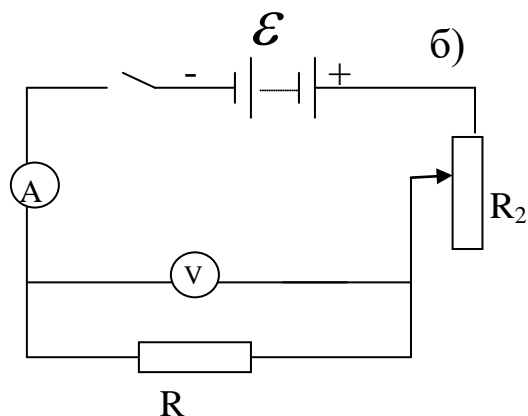
**ХОД РАБОТЫ**



**В процессе выполнения работы**  
**строго выполняйте правила техники безопасности.**

**А) ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ.**

1. Собирают цепь по схеме.



2. Определяют цену деления на измерительных приборах.
3. Снимают показания приборов и определяют неизвестное сопротивление  $R_1$  по формуле (6).
4. Измерения производят три раза, меняя величину тока реостатом  $R$ .
5. Рассчитывают среднее сопротивление  $R_{1cp}$ .
6. Заменяют сопротивление  $R_1$  на сопротивление  $R_2$  и повторяют пункты (3) и (4).
7. Рассчитывают среднее сопротивление  $R_{2cp}$ .
8. Подключают сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , соединенные между собой последовательно.
9. Повторяют пункты (3) и (4).
10. Рассчитывают среднее значение сопротивления  $R'_{cp}$ .
11. Рассчитывают общее сопротивление  $R'$  по формуле (21), используя средние значения  $R_{1cp}$  и  $R_{2cp}$ , и сравнивают с опытными данными  $R'_{cp}$ .
12. Подключают сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , соединенные между собой параллельно и повторяют пункты (3) и (4).
13. Рассчитывают среднее значение сопротивления  $R''_{cp}$ .

14. Рассчитывают общее сопротивление  $R''$  по формуле (22), используя средние значения  $R_{1cp.}$  и  $R_{2cp.}$ , и сравнивают с опытными данными  $R''_{cp.}$

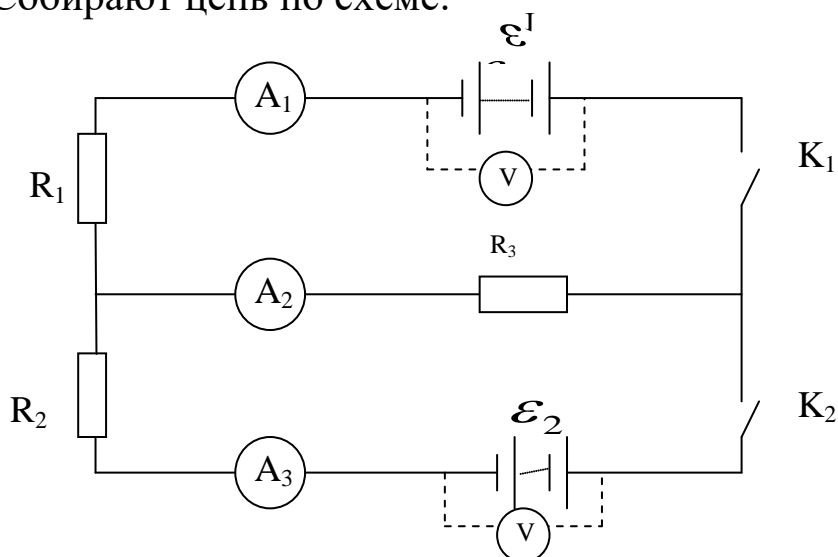
15. Данные, полученные опытами и расчетами, заносят в табл. 1.

Таблица 1

№	Первое сопротивление				Второе сопротивление.				Послед. соедин.				Паралл. соедин.			
	I	U	$R_1$	$R_c.$	I	U	$R_2$	$R_{cp.}$	I	U	$R'$	$R'_{cp}$	I	U	$R''$	$R''_{cp}$
1																
2																

### Б) РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПО ПРАВИЛАМ КИРХГОФА.

1. Собирают цепь по схеме.



2. Замыкают ключи  $K_1$  и  $K_2$ .

3. Снимают показания амперметров.

4. Разбирают цепь.

5. Измеряют ЭДС источников  $E_1$  и  $E_2$  для чего вольтметр подключают параллельно к каждому источнику тока при разомкнутой внешней цепи.

6. Рассчитывают токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  по законам Кирхгофа.

7. Сравнивают величины токов, рассчитанных теоретически и полученных в процессе эксперимента.

Таблица 2

	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$\mathcal{E}_1$	$\mathcal{E}_2$
Опыт.					
Теор.					

### ***Вопросы для самопроверки:***

1. Что называют электрическим током.
2. Носители тока в металлах, жидкостях, газах, полупроводниках.
3. Как направлен электрический ток?
4. Условия, необходимые для существования тока.
5. Какие явления сопровождают прохождение тока по проводнику?
6. Что называется силой тока? Единица измерения силы тока в СИ?
7. Каким прибором можно измерить силу тока и как включить его в электрическую цепь?
8. Каким прибором можно измерить напряжение на участке цепи и как включить его в электрическую цепь?
9. В чем состоит закон Ома для участка цепи?
10. Сопротивление – его характеристика и единица измерения.
11. Удельное сопротивление – его характеристика и единица измерения.
12. Вектор плотности тока – его характеристика и закон Ома в дифференциальной форме.
13. Поясните физический смысл ЭДС, напряжения и разности потенциалов. Единицы измерения.
14. Закон Ома для полной цепи.
15. Каким прибором и как можно измерить ЭДС?
16. Законы Джоуля – Ленца, Видемана – Франца.
17. В чем состоит первое правило Кирхгофа?
18. В чем состоит второе правило Кирхгофа?
19. Какое соединение проводников называют последовательным?
20. Чему равны общая сила тока, напряжение и сопротивление при последовательном соединении?
21. Какое соединение проводников называют параллельным?
22. Чему равны общая сила тока, напряжение и сопротивление при параллельном соединении?
23. Что такое короткое замыкание и как оно проявляет себя в электрической цепи?

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

### ТЕОРИЯ ЯВЛЕНИЯ

#### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Магнитное поле представляет собой особый вид материи, посредством которого взаимодействуют между собой движущиеся заряженные частицы. Определение магнитного поля можно дать следующим образом – **магнитное поле** – одна из форм проявления электромагнитного поля, *особенностью* которой является то, что это поле действует только *на движущиеся заряженные частицы и тела*.

Основные свойства магнитного поля.

1. Магнитное поле порождается электрическим током
2. Движущимися зарядами, а также переменным электрическим полем.

Магнитное поле обнаруживается по действию на электрический ток, движущиеся заряды и тела.

Неподвижные заряды **не создают** вокруг себя магнитного поля, поэтому магнитное поле не оказывает никакого действия на покоящиеся заряды.

**Силовой характеристикой магнитного поля** является *вектор магнитной индукции*  $\vec{B}$ .  $\vec{B}$  – силовая характеристика магнитного поля, т.к. проявляется магнитное поле действием на движущиеся заряды в нем.

В международной системе единиц (СИ)  $\vec{B}$  численно равен пределу отношения силы, действующей со стороны магнитного поля на участок проводника с током, расположенный перпендикулярно полю, к произведению силы тока на длину участка, стремящегося к нулю.

$$\vec{B} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{I \cdot \Delta l} = \frac{dF}{I \cdot dl} \cdot \quad (1)$$

Единицей магнитной индукции является тесла (Тл):

$$1Tл == 1 \frac{H}{a \cdot m}.$$

За направление вектора магнитной индукции в любой точке принимается направление, указываемое северным полюсом магнитной стрелки.

**Магнитное поле графически изображается с помощью линии магнитной индукции.**

Линии магнитной индукции (силовые линии) – касательные к которым в любой точке, совпадают с направлением вектора  $\vec{B}$ . Линии  $\vec{B}$  (в отличие от линий  $\vec{E}$  электростатического поля) не имеют начала и конца, т.е. являются замкнутыми.

**Подобные поля называют вихревыми**, если численное значение  $\vec{B}$  во всех точках поля **одинаково, то оно называется однородным.**

Для магнитного поля (как и для электрического) выполняется принцип **суперпозиции**. Результирующий вектор магнитной индукции в данной точке складывается из векторов магнитной индукции, созданной различными токами в этой точке:

$$\vec{B}_{\text{общ.}} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots$$

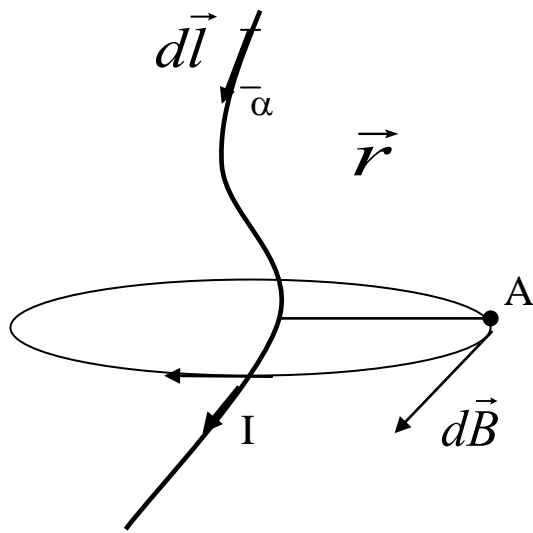
**Направление силовых линий магнитного поля определяется правилом буравчика:** если ввинчивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление движения рукоятки буравчика укажет направление линий магнитной индукции.

**Правило правой руки** для прямого тока. Если охватить проводник правой рукой, направив отогнутый большой палец по направлению тока, то кончики остальных пальцев в данной точке покажут направление вектора индукции в этой точке.

## Магнитное поле тока. Закон Био – Савара – Лапласа

Возьмем некоторый проводник с током  $I$  (см. рис. 1) и выделим элемент тока  $I \cdot d\vec{l}$ , из которого проведен радиус – вектор  $\vec{r}$  в точку  $A$  ( $\alpha$  – угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ ). В точке  $A$  элемент тока создает магнитное поле, элементарная индукция  $|d\vec{B}|$  которого определяется законом Био – Савара – Лапласа:

**Индукция магнитного поля, созданного элементом тока, прямо пропорциональна величине элемента тока  $I dl$  и обратно пропорциональна квадрату расстояния между элементом тока и точкой в пространстве, в которой поле определяется:**



Р и с. 1

$$|d\vec{B}| = k \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{r^2} \quad (2)$$

$$k = \frac{\mu_0}{4\pi},$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,

$\mu$  – магнитная проницаемость среды, поэтому, в общем случае:

$$|d\vec{B}| = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{4\pi \cdot r^2}.$$

Индукция  $\vec{B}$  магнитного поля, создаваемая всем проводником с током, согласно принципу суперпозиции, равна векторной сумме элементарных индукции всех элементов тока проводника с учетом его формы:

$$\vec{B} = \sum_i d\vec{B}_i, \quad (3)$$

где  $d\vec{B}_i = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{4\pi \cdot r^2}$ .

**Формула (3) – это закон Био – Савара – Лапласа.**

Существуют среды (ферромагнетики и т.д.), в которых  $\mu$  (магнитная проницаемость среды) является функцией поля, поэтому целесообразно ввести новую функцию, характеризующую поле и не зависящую от свойств среды – **напряженность магнитного поля в данной точке.**

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu \cdot \mu_0}.$$

**Формулу закона Био – Савара – Лапласа** можно записать в виде:

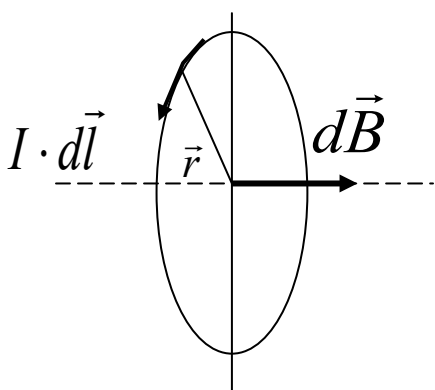
$$d\vec{H}_i = \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{4\pi \cdot r^2}.$$

Зная вектор  $\vec{H}$ , можно вычислить значение вектора  $\vec{B}$  в данной точке  $\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$ .

Физический смысл имеет именно вектор  $\vec{B}$ . Вектор  $\vec{H}$  – расчетная величина.

Единицей напряженности является (А/м).

а) **Магнитное поле в центре кругового тока.**



Р и с. 2

Круговым называется ток, протекающий по замкнутому проводнику. Для нахождения  $\vec{B}$  используем закон Био – Савара – Лапласа.

Выделим в круговом токе элемент тока  $I \cdot d\vec{l}$ . Применяя правило буравчика, укажем направление элементарной индукции  $d\vec{B}$ .

Видно, что для любого элемента тока вектор магнитной индукции  $d\vec{B}$  направлен вдоль оси кругового тока и перпендикулярен его плоскости, поэтому можно записать в скалярной форме:

$$\left| \int \vec{B} \right| = \int_0^l dB = \int_0^l \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{r^2} \quad (4)$$

Учитывая, что для кругового тока  $\sin \alpha = 1$  и  $r = R$ , получаем:

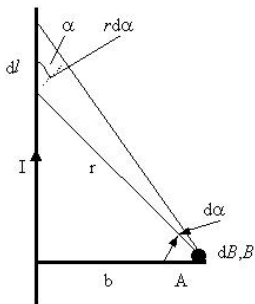
$$\left| \vec{B} \right| = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4\pi} \cdot \frac{I}{R^2} \int_0^l dl = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4\pi} \cdot \frac{I}{R^2} 2\pi \cdot R = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot I}{2 \cdot R}$$

т.е. **магнитная индукция в центре кругового тока в СИ:**

$$\left| \vec{B} \right| = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot I}{2 \cdot R} \quad (5)$$

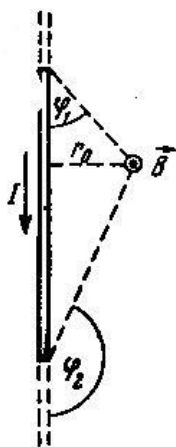
т.к.  $\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$ , то **напряженность** магнитного поля в центре кругового тока равна  $\left| \vec{H} \right| = \frac{I}{2R}$ .

**б) Магнитное поле прямого бесконечно длинного проводника с током в СИ:**



$$\left| \vec{B} \right| = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot R} ; \quad \left| \vec{H} \right| = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad (6)$$

**в) Магнитное поле прямолинейного проводника с током конечной длины в СИ**

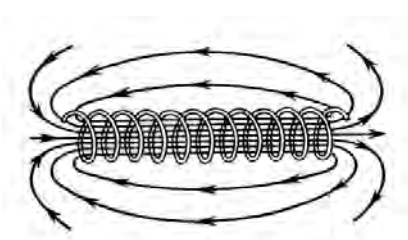


$$\left| \vec{B} \right| = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r_0} (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1) \quad (7)$$

$$\left| \vec{H} \right| = \frac{I}{4 \cdot \pi \cdot r_0} (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1)$$



### г) Магнитное поле на оси достаточно длинного соленоида в СИ



$$|\vec{B}| = \mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot n \quad (8)$$

$$|\vec{H}| = I \cdot n,$$

где  $n = \frac{N}{l}$ ,  $N$  – общее число витков,  $l$  – длина катушки.

Направление вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  определяют по правилу буравчика.

Северный полюс магнита – полюс, из которого выходят линии магнитной индукции.

Южный полюс магнита – полюс, в который входят линии магнитной индукции.

Сила Ампера – сила, действующая на проводник с током в магнитном поле.

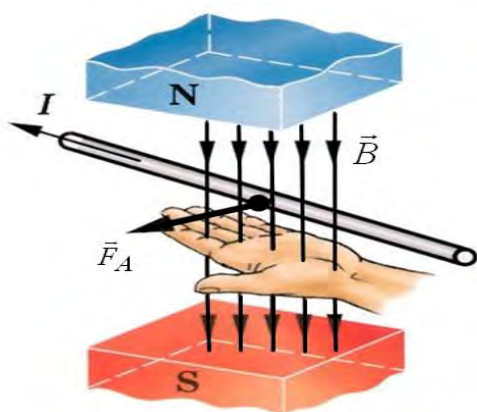
Магнитное поле оказывает силовое воздействие на проводник с током.

$$F = I \cdot \ell \cdot B \cdot \sin \alpha .$$

Сила, с которой магнитное поле действует на помещенный в него отрезок проводника с током, равна произведению силы тока, модуля вектора магнитной индукции, длины проводника и синуса угла между направлениями тока и магнитной индукции.

Направление силы Ампера определяется правилом левой руки.

#### Правило левой руки



Если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление тока в проводнике, а вектор магнитной индукции входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на отрезок проводника.

Так как электрический ток – это направленное движение заряженных частиц, то на все движущиеся заряженные частицы внутри проводника со стороны магнитного поля, действует сила Лоренца.

**Сила Лоренца** – сила, действующая на движущуюся заряженную частицу в магнитном поле.

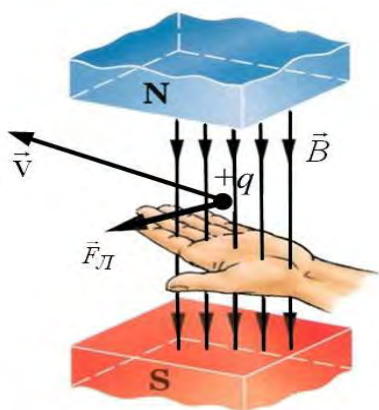
$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha ,$$

где  $\alpha$  – угол между скоростью заряженной частицы и вектором магнитной индукции.

Сила Лоренца перпендикулярна векторам  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Направление силы Лоренца определяет правило левой руки.

**Правило левой руки**

Если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление скорости положительного заряда (или противоположное скорости отрицательного заряда), а вектор магнитной индукции входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на данный заряд.

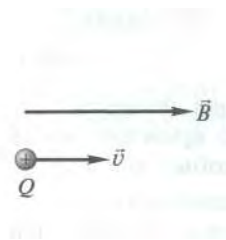


**Плоские траектории движения заряженных частиц в однородном магнитном поле.**

*Траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле зависит от угла между скоростью заряженной частицы и вектором магнитной индукции.*

**Рассмотрим сначала три важных частных случая.**

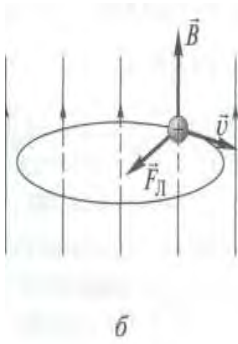
1. Заряженная частица влетает в магнитное поле параллельно линиям магнитной индукции:  $\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{B}$ .



В этом случае  $\alpha = 0$ ,  $\sin \alpha = 0$ ,  $F_L = 0$ . В отсутствие силы Лоренца частица (согласно принципу инерции) будет продолжать двигаться **равномерно и прямолинейно** с начальной скоростью вдоль линий магнитной индукции.

**Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле параллельно линиям магнитной индукции, движется равномерно вдоль этих линий.**

2. Заряженная частица влетает в магнитное поле со скоростью  $\vec{v} \perp \vec{B}$  перпендикулярно линиям магнитной индукции. В этом случае  $\alpha = 90^\circ$ ;  $\sin \alpha = 1$ ;  $F_L = qvB$ .



Сила Лоренца перпендикулярна скорости, поэтому модуль скорости частицы не изменяется, но **изменяется ее направление**. Сообщая частице постоянное центростремительное ускорение, сила Лоренца заставляет частицу массой  $m$  **двигаться по окружности**.

Найдем радиус этой окружности, используя второй закон Ньютона  $m \cdot a = F_L$

$$m \frac{v^2}{R} = q \cdot v_{\perp} B$$

или

следует, что

$$R = \frac{m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B} .$$

**Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции, движется в этой плоскости по окружности.**

Период обращения частицы по окружности в поперечном магнитном поле **не зависит от ее скорости:**

$$T = \frac{2\pi \cdot R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi \cdot m}{q \cdot B} .$$

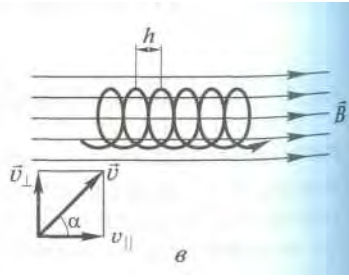
В соответствии с правилом левой руки для определения направления силы Лоренца **вращение отрицательного заряда по окружности происходит в направлении, противоположном вращению положительного заряда.**

**Направление вращения заряда определяет его знак.**

Заряженная частица влетает в магнитное поле со скоростью  $v$  под углом  $\alpha$  к вектору  $\vec{B}$  (рис. в).

В данном случае ее движение можно представить в виде суперпозиции: равномерного прямолинейного движения вдоль поля со скоростью  $v_{\parallel} = v \cdot \cos \alpha$ ; равномерного движения со скоростью  $v_{\perp} = v \cdot \sin \alpha$  по окружности в плоскости, перпендикулярной по-

лю. Радиус окружности определяется формулой ( $R = \frac{m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B}$ ).

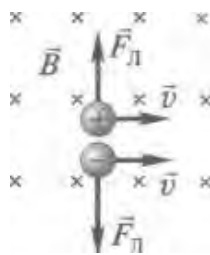


В результате сложения обоих движений возникает **движение по спирали**, ось которой параллельна магнитному полю (см. рис. в). Шаг винтовой линии  $h = v_{\parallel} \cdot T = v \cdot T \cdot \cos \alpha$ .

Подставив в последнее уравнение выражение ( $T = \frac{2\pi \cdot R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi \cdot m}{q \cdot B}$ ), получим

$$h = \frac{2\pi \cdot m \cdot v}{B \cdot q} \cos \alpha.$$

Направление, в котором закручивается спираль, зависит от знака заряда частицы.

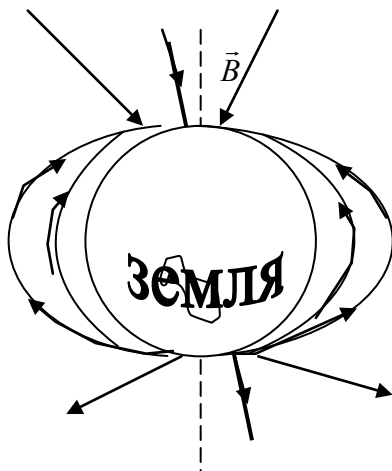


На рис. показано направление силы Лоренца, действующей на движущиеся положительный и отрицательный заряды (вектор магнитной индукции  $B$  направлен перпендикулярно чертежу, от нас). Сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости заряженной частицы, поэтому она изменяет только направление этой скорости, не меняя ее модуля. Следовательно, **сила Лоренца не совершает работу**.

Сила Лоренца не совершает работу.

#### д) Магнитное поле Земли.

Большой вклад в изучение природы магнетизма внес французский ученый Андре Ампер. Ампер выдвинул гипотезу, что магнитные свойства тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него.



Р и с. 3

Согласно гипотезе Ампера земля представляет собой естественный магнит. Об этом свидетельствует факт, что магнитная стрелка компаса ориентируется в каждой точке земной поверхности определенным образом. Ход силовых линий земного магнитного поля схематично изображен на рис. 3.

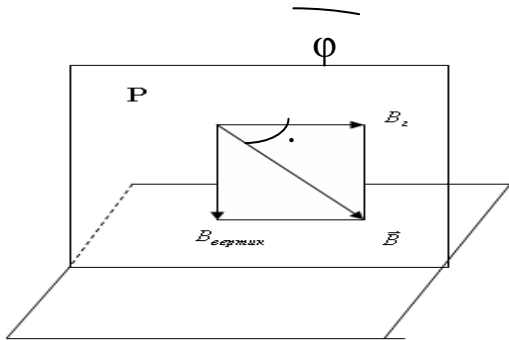
В северном полушарии все магнитные силовые линии сходятся в точке, лежащей на  $71^\circ$  северной широты и  $96^\circ$  западной долготы. Эта точка называется **южным магнитным**

полюсом Земли, а другая северным полюсом. Так как магнитные и географические полюса Земли не совпадают, то магнитная стрелка указывает направление север – юг только приблизительно. Прямую, по которой плоскость силовых линий в данном месте пересекается с плоскостью горизонта, называют **магнитным меридианом**. Угол между направляющими магнитного и географического меридианов называется **магнитным склонением**. Его принято обозначать буквой  $\varphi$  и величина его меняется от места к месту на земном шаре.

На рис. 3. видно, что силовые линии магнитного поля не параллельны поверхности Земли. Это означает, что вектор индукции магнитного поля Земли не лежит в плоскости горизонта данного места, а образует с ней некоторый угол  $i$ . Этот угол называется **магнитным наклоением**. Магнитное наклонение обычно обозначается буквой  $i$ . Величина магнитного наклонения в разных местах Земли различна.

Магнитное склонение и магнитное наклонение углы  $\varphi$  и  $i$  полностью определяют направление вектора индукции  $\vec{B}$  земного магнитного поля в данном месте. Определим численное значение  $\vec{B}$  (рис. 4).

Пусть  $P$  плоскость магнитного меридиана. Лежащий в этой плоскости вектор  $\vec{B}$  можно разложить на две составляющие:  $\vec{B}_r$  и



Р и с. 4

$\vec{B}_{\text{верт}}$ . Зная наклонение ( $i$ ) и величину одной из составляющих, можно вычислить другую составляющую и сам вектор  $\vec{B}$ . На практике оказывается наиболее просто измерима именно горизонтальная составляющая индукции магнитного поля  $\vec{B}_r$ .

Поэтому чаще всего величину индукции магнитного поля  $\vec{B}$  в том или ином месте Земли характеризуют величиной ее горизонтальной составляющей  $\vec{B}_r$ . Таким образом, три величины: склонение, наклонение и численное значение горизонтальной составляющей  $\vec{B}_r$  полностью характеризуют по величине и направле-

нию индукцию магнитного поля Земли. Эти три величины называют элементами земного магнитного поля.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** – определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ТАНГЕНС-БУССОЛИ**

Метод определения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли с помощью тангенс-буссоли основан на изучении поведения магнитной стрелки одновременно в магнитном поле Земли и магнитном поле кругового тока.

Тангенс-буссоль представляет собой круговой проводник из витков, прилегающих достаточно плотно друг к другу, расположенных вертикально в плоскости магнитного меридиана.

В центре кругового проводника помещена на острие небольшая магнитная стрелка (при достаточно большом радиусе витка можно считать, что магнитная стрелка находится в однородном магнитном поле).

Если по катушке пропустить ток  $I$ , то возникает магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ , направленное перпендикулярно к плоскости катушки.

Таким образом, на стрелку будут действовать два взаимно перпендикулярных магнитных поля: магнитное поле Земли  $\vec{B}_2$  и магнитное поле тока  $\vec{B}$ .

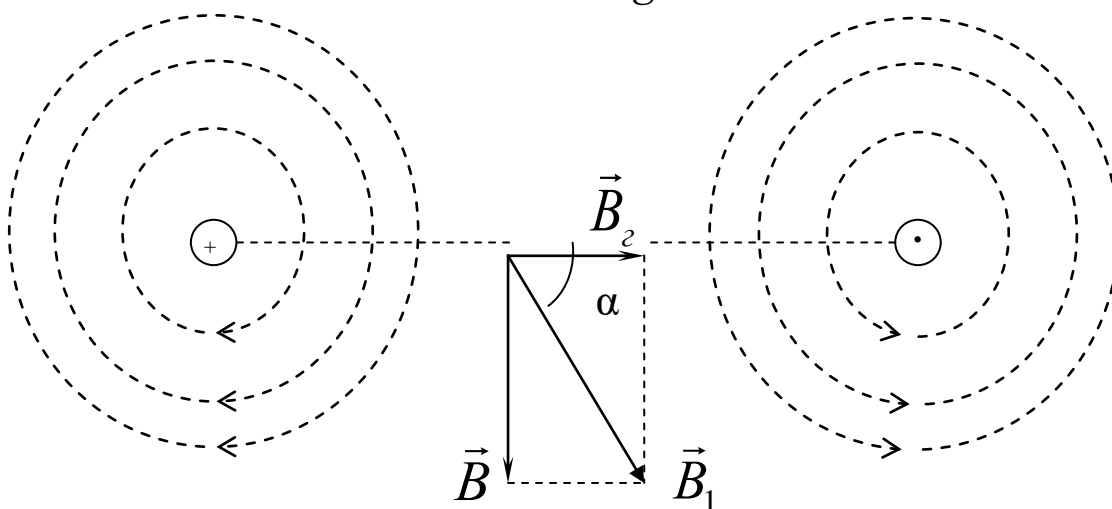
На рис. 5 изображено сечение катушки горизонтальной плоскостью. Здесь  $\vec{B}$  – вектор индукции поля, созданного круговым током,  $\vec{B}_2$  – горизонтальная составляющая магнитного поля Земли.

Стрелка установится по направлению равнодействующей т.е по диагонали параллелограмма, сторонами которого будут  $\vec{B}_2$  и  $\vec{B}$ . Из рис. 5 следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B}{B_2},$$

откуда

$$B_2 = \frac{B}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (9)$$



Р и с. 5

Величина индукции магнитного поля в центре одного кругового витка ( $B_1$ ) определяется по уравнению (5), а для  $N$  витков:

$$B = B_1 \cdot N = N \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot I}{2R} \quad (10)$$

Подставляя (7) в уравнение (6), получим расчетную формулу для  $B_2$ :

$$B_2 = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot I \cdot N}{2 \cdot R \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (11)$$

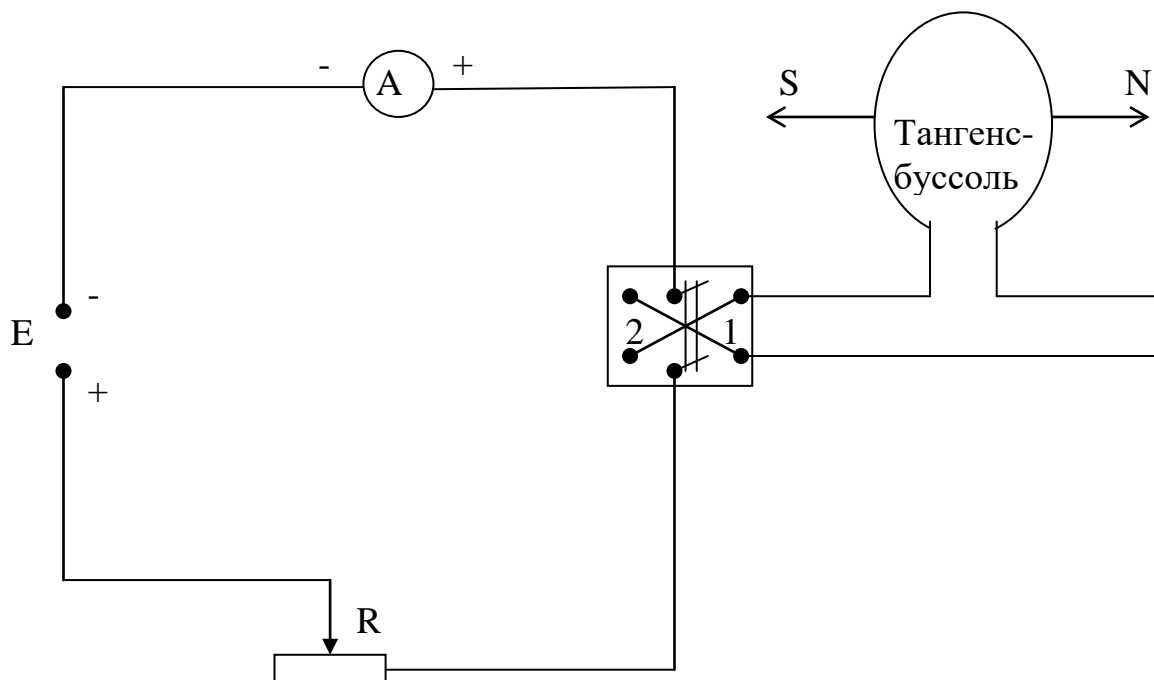
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: тангенс-буссоль, амперметр, переключатель, источник постоянного тока, реостат.

#### ХОД РАБОТЫ

1. Собирают цепь по схеме:



**В процессе выполнения работы строго соблюдайте правила техники безопасности!**

2. Тангенс-буссоль необходимо установить подальше от всех остальных приборов, чтобы не было постороннего влияния на магнитную стрелку.
3. Устанавливают тангенс-буссоль по уровню, а затем, поворачивая, устанавливают плоскость катушки в плоскости магнитного меридиана (по направлению стрелки компаса). Совмещают конец северного полюса стрелки с нулевым делением шкалы компаса.
4. Включают блок питания, ставят переключатель в положение 1 и, меняя положение движка реостата, устанавливают по амперметру силу тока  $I = 0,2 \text{ А}$ .
5. Когда магнитная стрелка придет в равновесие, отсчитывают по шкале установки угол отклонения стрелки  $\alpha_1$ .
6. Не меняя величины тока  $I$ , изменяют переключателем 2 его направление и измеряют величину отклонения стрелки в другую сторону  $\alpha_2$ .
7. По углам  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  находят среднее значение угла  $\alpha_{cp}$ .
8. Изменяя положение движка реостата, опыт повторяют при других значениях тока ( $I_2 = 0,3 \text{ А}$ ,  $I_3 = 0,4 \text{ А}$ ).



9. Находят три значения индукции магнитного поля Земли, подставляют последовательно измеренные значения  $I$  и  $\alpha_{cp.}$  в рабочую формулу (11)

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha} ,$$

где  $N = 63$  – число витков,  
 $R = 24,5$  см – радиус катушки,  
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

10. Находят среднее значение  $B_z$ .

11. Все полученные опытом результаты заносят в таблицу.

Таблица

$I, A$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_{cp.}$	$B_z$	$B_{z. cp.}$	$B_z$ (табличные данные)
0,2						20 $10^{-6}$ Тл
0,3						
0,4						

12. Сопоставляют полученные опытом значение  $B_z$  с табличным  $B_z$  в данном месте Земли. Определяют абсолютную погрешность измерения  $\Delta B_z$ , записывают окончательный результат в виде:

$$B_z = (B_{z. cp.} \pm \Delta B_{z. cp.}) \text{ Тл.}$$

13. Находят относительную погрешность опытных измерений.

14. Делают вывод о точности измерений  $B_z$  используемым методом.

**Вопросы для самопроверки:**

1. Какая векторная физическая величина характеризует магнитное поле?
2. Дайте определение понятия линий магнитной индукции.
3. Как с помощью силовых линий можно изобразить магнитное поле прямого, кругового токов и соленоида?
4. В чем заключается характерная особенность линий магнитной индукции и что это значит?
5. Сформулируйте правило буравчика и правило правой руки.
6. Сформулируйте принцип суперпозиции для магнитного поля.

7. Сформулируйте, сделайте рисунок и запишите математическое выражение (формулу) закона Био – Савара – Лапласа.
8. Чему равна индукция магнитного поля в центре кругового тока (вывод)?
9. Чему равна индукция магнитного поля на оси соленоида (вывод)?
10. Чему равна индукция магнитного поля прямого тока (вывод)?
11. Закон Ампера (действие магнитного поля на проводник с током).
12. Запишите его математическое выражение.
13. Как определяется направление силы Ампера?
14. Дайте определение силы Лоренца. Чему равен ее модуль?
15. Как определяется направление силы Лоренца?
16. Чем, согласно гипотезе Ампера, вызван земной магнетизм?

## Список литературы

1. Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст]/ И.В. Савельев.– т.2.– СПб.: Лань, 2022.– 426 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст]/Т.И. Трофимова.– М.: Академия, 2020.–560 с.
3. Грабовский, Р.И. Курс физики [Текст]/ Р.И. Грабовский.– СПб.: Лань, 2009.– 608 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Правила техники безопасности .....	3
<b>Лабораторная работа 1</b>	
Измерение коэффициента самоиндукции, емкости и проверка закона Ома для переменного тока .....	5
<b>Лабораторная работа 2</b>	
Изучение электрических свойств р-n-перехода.....	22
<b>Лабораторная работа 3</b>	
Снятие характеристик полупроводникового триода .....	30
<b>Лабораторная работа 4</b>	
Исследование работы трехэлектродной электронной лампы как усилителя .....	38
<b>Лабораторная работа 5</b>	
Градуировка термопары и определение ее удельной термоЭДС .....	46
<b>Лабораторная работа 6</b>	
Изучение зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры .....	56
<b>Лабораторная работа 7</b>	
Применение законов Ома и Кирхгофа для расчета электрических цепей...	62
<b>Лабораторная работа 8</b>	
Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля земли.....	76
Список литературы .....	91

*Учебное издание*

*СЛАВОРОСОВА Елена Викторовна*

## **Электричество и магнетизм**

Учебно-методическое пособие

*Технический редактор Ю.И. Чикавинский*

*Корректор Г.Н. Елисеева*

Подписано в печать 17.06.2023 г.

Объем 6,0 усл. печ. л.

Заказ № 200-Р

Формат 60/90 1/16

Тираж 100 экз.

**ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА**  
**160555 г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, 2**