

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**имени М. В. Ломоносова**

---

**Физический факультет  
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния**

**Методическая разработка  
по общему физическому практикуму**

**Лаб. работа № 2**

**ПОСТОЯННЫЙ ТОК**

**Работу поставил доц. Попов Ю. Ф.**

**Москва - 2011**

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

## ПОСТОЯННЫЙ ТОК.

**Цель работы:** экспериментальная проверка законов Ома и правил Кирхгофа.

**1. Ток и напряжение.** Если внутри проводника электрическое поле отлично от нуля, то в проводнике возникает электрический ток, т.е. направленное движение зарядов. Мерой электрического тока является сила тока  $I$  — количество электричества, протекающее через сечение проводника в единицу времени. Если  $I$  не зависит от времени, ток называют постоянным.

Основной закон постоянного тока — закон Ома — имеет вид

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}, \quad (1)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — значения потенциала у начала и конца проводника (считая по направлению тока),  $R$  — сопротивление проводника. Направлением тока считается то направление, в котором под действием поля должны были бы двигаться положительные заряды, другими словами: считается, что ток течет от большего потенциала к меньшему ( $\varphi_1 > \varphi_2$ ). Разность потенциалов можно выразить так:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E_e dl,$$

где  $dl$  — элемент длины проводника (см. задачу 1).

Линейный интеграл поля  $E$  носит название напряжения между точками:

$$U_{12} = \int_1^2 E_e dl, \quad (2)$$

Сравнивая (1) и (2) имеем

$$IR = U_{12},$$

Это соотношение выполняется не только в случае постоянного тока (1), но и для быстропеременных токов.

Почему электрическое поле постоянных токов потенциально? Дело в том, что в поле постоянных токов распределение заряда в пространстве должно оставаться стационарным, т.е. неизменным во времени, в противном случае условие постоянства токов не выполняется. Но если распределение зарядов стационарно, то поле их должно быть тождественно с полем соответственно распределенных неподвижных зарядов. То обстоятельство, что в данной точке пространства одни элементы заряда благодаря току сменяются другими, не может сказываться на напряженности поля  $E$ . Таким образом, стационарное поле постоянных токов, как и поле электростатическое, должно быть полем потенциальным. Из стационарности

распределения заряда следует, что токи должны быть либо замкнуты, либо уходить в бесконечность, ибо в противном случае в месте начала или окончания тока происходило бы накопление или убывание заряда. По той же причине через различные сечения проводника (при отсутствии разветвлений) должен протекать ток одинаковой силы. Наконец, в каждой точке разветвления цепи тока (узла) должен удовлетворяться первый закон Кирхгофа:

$$\sum I_1 = 0,$$

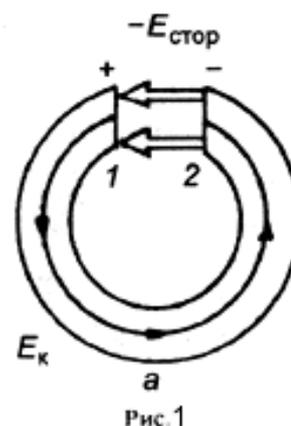
т.е. алгебраическая сумма токов, проходящих через узел, равна нулю. В противном случае в узле происходило бы накопление зарядов.

При движении зарядов на них действует постоянная сила со стороны поля ( $E = \text{const}$ ), которая вызывает ускорение, но условие  $I = \text{const}$  означает, что заряды движутся с постоянной скоростью. Если система подчиняется закону Ома, то это должно происходить из-за того, что для таких носителей скорость пропорциональна силе. Следовательно, заряды не могут двигаться свободно, что-то должно мешать движению, вызываемому электрическим полем.

Соппротивление движению зарядов обусловлено столкновениями носителей заряда друг с другом и с любыми частицами среды.

## 2. Электродвижущие силы.

Так как линии постоянного тока замкнуты или уходят в бесконечность, то реально создать постоянный ток можно только в замкнутых цепях. Для получения постоянного тока необходимо любым способом заряд, пришедший, из 1 в 2 (по пути 1-а-2) перенести, преодолев электростатические силы, опять в 1 для следующего прохождения этих зарядов по пути 1-а-2 и т.д. (рис. 1).



Таким образом, на электрические заряды, движущиеся в проводниках, действуют силы электростатического поля (источником которого являются сами заряды) и силы не электростатические (их называют сторонними). Общая сила, отнесенная к единице заряда, т.е. общая напряженность,двигающая заряды  $\vec{E} = \vec{E}^k + \vec{E}^{\text{стоп}}$ , и напряжение между точками 1 и 2 может быть записано

$$E_{12} = \int_1^2 E_e^k dl + \int_1^2 E_e^{\text{стоп}} dl = E_{12}^k + E_{12}^{\text{стоп}}, \quad (3)$$

$E_{12}^{\text{стоп}}$  - напряжение сторонних сил называют электродвижущей силой (ЭДС).

$E_{12}^k = \varphi_1 - \varphi_2$  - по определению [см. (1)]. В этих обозначениях закон Ома имеет вид

$$IR_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + E_{12}^{\text{стоп}} \quad (4)$$

Для замкнутой цепи  $\varphi_1 = \varphi_2$  и  $IR = E^{стоп}$ , где  $E^{стоп} = \int E_e^{стоп} dl$  — полная ЭДС в цепи тока. Отсюда следует, что в замкнутой цепи при отсутствии ЭДС сила постоянного тока равна нулю. Заметим, что название ЭДС не отражает ее физического содержания, так как по смыслу ЭДС не сила, а, как это следует из определения, работа по перемещению единичного положительного заряда по замкнутой цепи.

Следствием закона Ома (4) является второе правило Кирхгофа: в замкнутом контуре алгебраическая сумма падений напряжения равна алгебраической сумме ЭДС, находящихся в данном контуре:

$$\sum I_i R_i = \sum E_k \quad (5)$$

### 3. Правила Кирхгофа.

Первое правило:

$$\sum I_i = 0. \quad (6)$$

Токи, входящие в узел, считаются положительными, а выходящие из узла — отрицательными. Если полная схема содержит  $m$  узлов, то уравнения (6) составляются для  $m-1$  узлов.

Второе правило:

$$\sum I_i R_i = \sum_k E_k \quad (7)$$

Для составления уравнения (7) надо обойти замкнутый контур, выделенный в общей цепи. При обходе контура направление (по часовой стрелке или против нее) выбирается произвольно. Падение напряжения считается положительным, если выбранное заранее направление тока на этом участке между двумя узлами совпадает с направлением обхода контура, и отрицательным, если направление тока противоположно направлению обхода. ЭДС считается положительной, если при обходе по контуру источник тока проходится от отрицательного полюса к положительному и отрицательной в противном случае. При составлении уравнений для контуров нужно следить за тем, чтобы каждый вновь взятый контур не мог быть получен сложением или вычитанием уже рассмотренных контуров. Полное число уравнений, составленных по правилам Кирхгофа, должно совпадать с числом участков между узлами, т.е. с числом различных токов в данной схеме.

**Установка:** макет электрической схемы с источниками ЭДС, вольт-амперомметр.

## Порядок выполнения работы.

### У п р а ж н е н и е 1. Измерение сопротивлений и ЭДС.

1. Не включая макет электрической схемы (рис. 3) в сеть, разомкнуть переключки между точками 1-0, 2-0, 3-0.

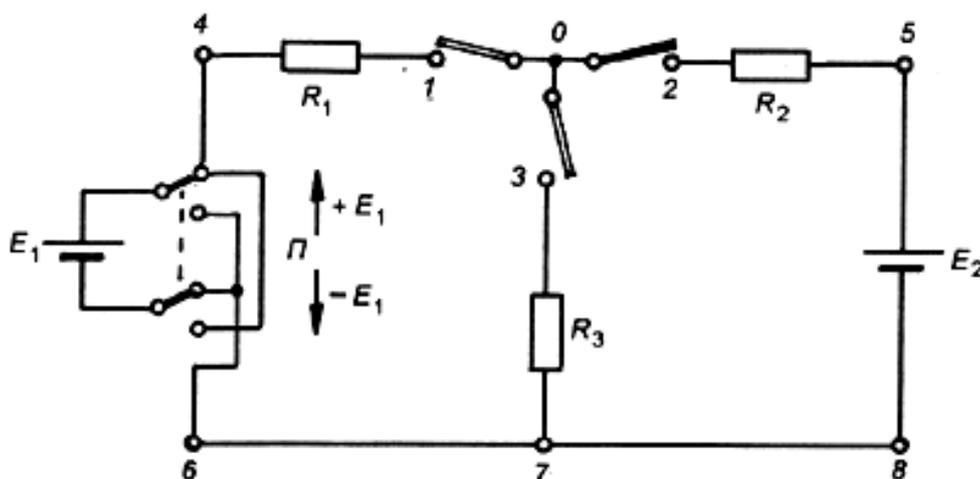


Рис. 3

Включить универсальный прибор в режим измерения Сопротивления (кнопки "=", "R"), установить предел измерения "2 кОм". Подключить провода со щупами к соответствующим гнездам на входе прибора (красный провод к гнезду "R", черный - к гнезду "\*").

2. Произвести измерение сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , включенных на соответствующих участках цепи 1—4, 2—5, 3—7. Прибор показывает сопротивление участка цепи между точками, к которым подключаются щупы. Показания прибора при выбранном пределе будут выражены в килоомах. Измеренные значения сопротивлений записать в тетрадь:

$$R_1 = \underline{\hspace{2cm}} \quad R_2 = \underline{\hspace{2cm}} \quad R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$$

3. Включить схему-макет в сеть при разомкнутых переключках 1-0, 2-0, 3-0. Установить прибор в режим измерения постоянного Напряжения (кнопки "U", "=", красный провод в гнезде с символом "U", предел измерения 20 В).

4. Измерить разность потенциалов в точках 6—4 и 8—5. При полностью разомкнутой цепи полученные значения разности потенциалов равны действующим на соответствующих участках схемы ЭДС. Измеренные значения ЭДС записать:

$$E_1 = \underline{\hspace{2cm}} ; E_2 = \underline{\hspace{2cm}} ; E_3 = \underline{\hspace{2cm}}$$

## У п р а ж н е н и е 2.

### Проверка закона Ома для однородного участка цепи.

1. Замкнуть цепь перемычками 1—0, 0—3 (перемычка 0—2 разомкнута). Это позволяет моделировать однородный участок цепи (без ЭДС), изображенный на рис. 3. Положение переключателя "П" вверх (+ $E_1$ ).

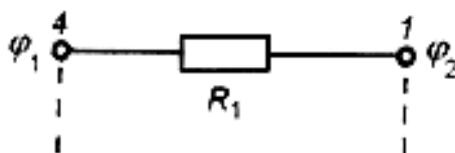


Рис. 4

2. Включить макет-схему в сеть. Установить вольт-ампер-омметр в режим измерения постоянного напряжения (кнопки  $U$ , "="), установить предел измерения  $20\text{ В}$ . Включить провода со щупами в гнезда (красный — в гнездо " $U$ ", черный — в гнездо " $*$ ") прибора. Подключить щупы к точкам 1—4 (рис. 4) и измерить разность потенциалов на участке с  $R$ . Записать полученное значение.

Знак измеренной разности потенциалов зависит от порядка подключения щупов к точкам 1-4. Если на шкале прибора высвечиваются только цифры без знака, то измеряемая величина положительна ( $>0$ ), т.е. это означает, что потенциал точки, к которой подключен красный щуп, больше потенциала точки, которой касается черный щуп, на величину показания прибора. Если поменять точки присоединения щупов, то на шкале прибора появится примерно то же значение (с учетом погрешности прибора), но со знаком "*минус*", т.е. в этом случае измеряемая величина разности потенциалов отрицательна. Таким образом, прибор всегда показывает разность потенциалов между двумя точками, причем с учетом знака "+" или "-" мы измеряем потенциал точки, касаясь ее красным щупом, по отношению к потенциалу точки, соединенной с черным щупом. В большинстве случаев потенциал второй точки можно считать равным нулю, либо он действительно равен нулю, если приборы заземлены;

Так как за положительное направление тока принято считать направление в сторону уменьшения потенциала, то все выше упомянутое остается в силе и при измерении постоянных токов.

3. Перевести прибор в режим измерения постоянного тока (кнопки " $I$ ", "=", красный щуп в гнезде " $I$ "). Установить предел измерения  $20\text{ mA}$ . Разомкнуть перемычку 1-0 (рис. 2) и подсоединить красный щуп к точке 1, а черный щуп к точке 0. При этом показание прибора будет соответствовать положительному значению тока (ток через  $R$  идет слева направо). Поменяв щупы местами, убедиться, что показание прибора сменит знак на противоположный.

Разобраться, как с учетом порядка присоединения щупов и знака показаний прибора уверенно определять направление тока в цепи, Стрелкой отметить направление тока и записать его величину  $I_{R1} = \text{_____ mA}$  ( $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$ ).

4. Используя измеренные значения разности потенциалов  $U_{RI}$  и закон Ома для участка цепи, найти сопротивление этого участка по формуле

$$R_1 = \frac{U_{RI}}{I_{RI}}.$$

Сравнить полученное значение  $R_1$  со значением, измеренным ранее непосредственно.

5. Повторить аналогичные измерения на участке цепи, содержащим  $R_3$ .

### Упражнение 3.

#### Проверка закона Ома для неоднородного участка цепи.

1. Замкнуть переключки 1—0 и 2—0, переключку 0—3 разомкнуть. Переключатель "П" — в положении вверх. При этом моделируется участок цепи, содержащей ЭДС (рис. 5,а).

2.

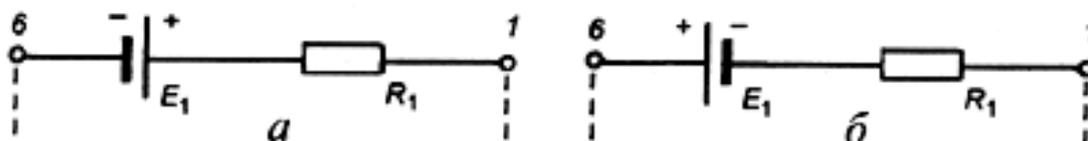


Рис. 5

2. Прибором в режиме вольтметра (предел  $20\text{V}$ ) измерить разность потенциалов между точками 1-6, записать полученное значение с учетом знака

$$U_{1-6} = \varphi_1 - \varphi_6.$$

3. Перевести прибор в режим измерения тока (предел измерения  $20\text{mA}$ ), разомкнуть переключку 1-0, подсоединить щупы прибора к точкам 1 и 0, Измерить и записать значение тока на этом участке цепи (1-6). С учетом порядка подключения щупов и знака показания прибора определить направление тока и отметить его стрелкой  $I_1 = \text{_____}$ .

4. Имея значения величин  $E_1, I, R$  и  $\varphi_1 - \varphi_6 = U_{16}$ , проверить справедливость закона Ома для участка цепи с ЭДС:

$$I_1 R_1 = \varphi_1 - \varphi_6 \pm E_1.$$

5. Провести аналогичные измерения и проверку закона Ома, изменив полярность включения  $E_1$  (рис. 5б), для чего перевести переключатель "П" на схеме-макете в положение "вниз" ( $-E_1$ ). Дальнейший порядок действий - как в п.2-4 данного упражнения.

## Упражнение 4.

### Проверка закона Ома для замкнутой цепи и определение внутреннего сопротивления источника ЭДС.

1. Смоделировать цепь, изображенную на рис. 6,а, для чего замкнуть переключки 1-0, 3-0, переключка 2-0 разомкнута, переключатель "И" в положении "вверх" (+ $E_1$ ).

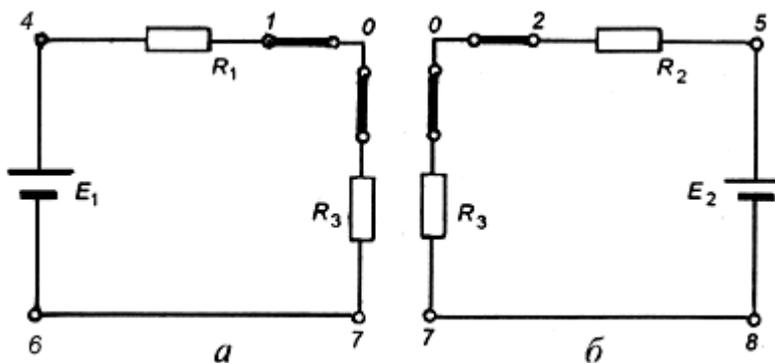


Рис. 6

2. Измерить напряжение  $U_R$  в точках 4—6. Перевести прибор в режим измерения тока, разомкнуть переключку 1-0 или 0—3, измерить ток в цепи и определить его направление. Записать полученные значения  $U_R$  и  $I_1$  (следует отметить, что полученное значение разности потенциалов  $U_{46} = U_R$  является падением напряжения во внешней (по отношению к источнику ЭДС) цепи, т.е. на сопротивлениях  $R_1$  и  $R_3$ , в чем легко убедиться, измерив по отдельности  $U_{R1}$  и  $U_{R3}$ . В то же время это значение разности потенциалов, как следует из закона Ома для замкнутой цепи, равно

$$U_{4-6} = I_1(R_1 + R_3) = E_1 - I r_1.$$

где  $r_1$  - внутреннее сопротивление источника ЭДС  $E_1$ . Эта формула позволяет косвенным способом получить значение внутреннего сопротивления источника ЭДС, которое нельзя измерить прибором непосредственно, как это делалось в упражнении 1.

3. Используя ранее полученные значения  $R_1$ ,  $R_3$  и  $\varepsilon_1$  и измеренные значения  $I_1$  и  $U_{1-6}$ , оценить величину внутреннего сопротивления источника ЭДС  $E_1$  по одной из формул

Так как  $r_1$  мало по сравнению с  $(R_1 + R_3)$ , то в пределах 10 % точности должно совпадать измеренное значение тока  $I_1$  со значением, полученным по формуле

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1 + R_3}.$$

4. Аналогичным образом определяется внутреннее сопротивление источника ЭДС  $E_2$  в замкнутой цепи 0-2-5-8-7-3-0 (рис. 6,б). Для этого необходимо

разомкнуть переключку 1-0 и замкнуть переключки 0-2, 0-3 и измерить разность потенциалов  $U_{5-8}$  и ток  $I_2$  так, как это делалось в предыдущих пунктах для  $E_1$ . Внутреннее сопротивление источника ЭДС  $E_2$ , рассчитывается по формулам

$$r_2 = \frac{E_2 - U_{5-8}}{I_2} \quad \text{или} \quad r_2 = \frac{E_2}{I_2} - R_2 - R_3.$$

### Упражнение 5. Проверка правил Кирхгофа.

1. Смоделировать разветвленную электрическую цепь, для чего замкнуть все три переключки (рис. 2). В этой цепи имеется два узла: точки 0 и 7 и три замкнутых контура 4-0-5-8-7-6, 4-0-7-6 и 0-5-8-7.

2. Прибором в режиме вольтметра измерить падение напряжения на сопротивлениях  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  (точки 4-1, 2-5 и 3-7 соответственно).. Перевести прибор в режим измерения тока (предел  $20 \text{ mA}$ ). Поочередно размыкая переключки 1-0, 0-2 и 0-3 и подключая прибор, измерить значения токов через соответствующие сопротивления  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$ . Стрелками отметить на схеме в тетради направление токов.

3. Произвести проверку 1-го правила Кирхгофа для одного из узлов

$$\sum I_i = 0.$$

Чем будет отличаться аналогичное уравнение, записанное для другого узла?

4. Используя измеренные значения  $U_i$ ,  $I_i$  и ранее полученные значения  $R_i$ ,  $r_i$  и  $\varepsilon_i$ , составить с учетом направления токов и направления обхода контура уравнения 2-го правила Кирхгофа для каждого из трех контуров

$$\sum_i I_i R_i + I_i r_i = \sum_k E_k.$$

Убедиться, что третье из полученных уравнений является линейной комбинацией первых двух (может быть получено из них).

5. Повторить аналогичные измерения и расчеты, описанные в пунктах 1-4, изменив полярность включения источника ЭДС  $E_1$  на противоположное [перевести переключатель "П" в положение "вниз" ( $-E_1$ )].

6. По окончании работы выключить приборы и отсоединить макетную схему от сети!!!

**КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ  
О РАСПОЛОЖЕНИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНОМ НАЗНАЧЕНИИ  
ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ,  
ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ**

**I. Универсальный прибор — вольтамперомметр (рис. 1).**

1. Гнездо для подключения щупа (красного) при измерении  $U$  и  $R$ .
2. Гнездо для подключения щупа (красного) при измерении  $I$ .
3. Гнездо для подключения черного щупа (заземление).
4. Включение прибора.
5. Измерение постоянных величин  $U, I, R$  — кнопка отжата (=), измерение переменных величин  $U, I$  — кнопка нажата.
6. Переключение рода работы: вольтметр —  $U$ , амперметр —  $I$ , омметр —  $R$ .
7. Предел измерений  $200\text{ мВ}, \text{мкА}, \text{Ом}$  в зависимости от рода работы.
8. Пределы измерений  $2, 20, 200, 2000, \text{В}; \text{мА}; \text{кОм}$  в зависимости от рода работы.
9. Световое табло.
10. Подсветка светового табло.

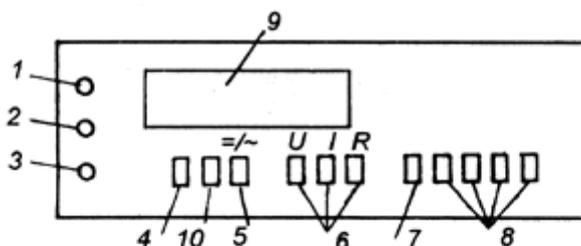


Рис. 1

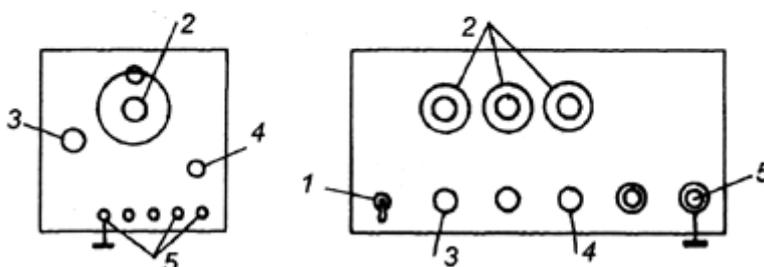


Рис. 2

## II. Генератор переменного напряжения (рис. 2 а, б).

1. Включение прибора (для ГЗ-III включение вилки в сетевую розетку).
  2. Декадные переключатели частоты (ГЗ-118), плавная установка частоты (ГЗ-III).
  3. Переключатель "Множитель"; значение частоты, установленное ручками 2, надо умножить на коэффициент, на который указывает штрих на ручке.
  4. Регулятор выходного напряжения.
- Гнезда, с которых снимается выходное напряжение переменной частоты.

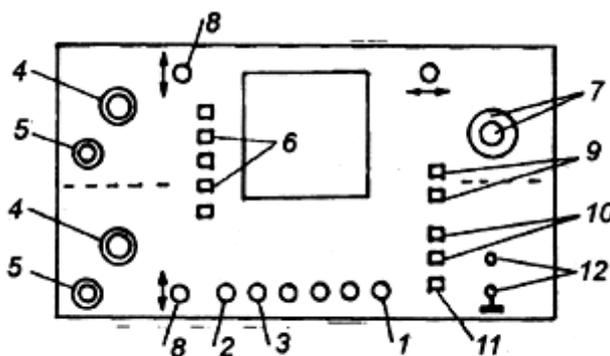


Рис. 3

## III. Осциллограф (рис. 3).

1. Включение осциллографа.
2. Управление яркостью свечения лучей.
3. Фокусировка лучей.
4. Ступенчатое переключение чувствительности каналов осциллографа ( $B/cm$ ,  $mB/cm$ ). Плавная регулировка усиления не используется (ручки в крайнем положении по часовой стрелке).
5. Входные гнезда каналов осциллографа.
6. Кнопки включения одновременной работы обоих каналов.
7. Ступенчатое переключение частоты горизонтальной развертки. В центре — ручка плавной подстройки частоты развертки, — используется для стабилизации изображения на экране.
8. Ручки вертикального смещения лучей.
9. Кнопки включения внутренней синхронизации развертки от 1 и 2 каналов.
10. Кнопки включения внешней синхронизации развертки.

11. Кнопка переключения осциллографа для работы в X-Y-режиме, когда требуется наблюдение одного сигнала как функции, зависящей от другого.
12. Вход внешнего сигнала, обеспечивающего горизонтальную развертку в X-Y-режиме.

## ВОПРОСЫ.

1. Какие условия необходимы для длительного протекания тока по проводнику? Что называется силой тока?
2. Есть ли электрическое поле внутри проводника, по которому течет ток, и куда оно направлено?
3. Запишите закон Ома для участка цепи без ЭДС.
4. Определите величину ЭДС. Покажите на примере замкнутой цепи, что ЭДС численно равна сумме падений напряжений во внутренней и внешней частях цепи. Получите отсюда закон Ома для полной цепи.
5. Получите закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС. Какие правила знаков для тока и ЭДС необходимо использовать для правильного применения этого закона?
6. Сформулируйте первый закон Кирхгофа и правило знаков для токов в этом законе.
7. Выведите второй закон Кирхгофа, рассмотрев замкнутый контур в разветвленной цепи и применив закон Ома для участка цепи с ЭДС для каждого участка контура.
8. Как формулируются правила знаков для токов и ЭДС в случае замкнутого контура?
9. Сколько уравнений первого закона и сколько уравнений второго закона необходимо записать, чтобы определить максимальное число неизвестных величин в данной разветвленной цепи?

## ЛИТЕРАТУРА.

1. Белов Д.В. «Электромагнетизм и волновая оптика». Учебное пособие. Изд. Московского университета, 1994 г.  
Часть I. Электромагнетизм.  
Глава IV. Законы электрического тока.  
§ 10. Постоянный ток.
2. Савельев И.В. «Курс общей физики»: Учебное пособие. Кн. 2. «Электричество и магнетизм», Издание 4-е. Москва. Наука, Физматлит.1998.  
Глава 5. Постоянный электрический ток.  
5.1. Электрический ток.  
5.3. Электродвижущая сила.

- 5.4. Закон Ома. Сопротивление проводников.
- 5.5. Закон Ома для неоднородного участка цепи.
- 5.6. Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа.