

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. Ломоносова

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

**Методическая разработка
по общему физическому практикуму**

Лаб. работа № 02-А

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Работу поставили доц. Авксентьев Ю.И., доц. Попов Ю. Ф.

Москва - 2022

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 φ_1 и φ_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:

$$\sum I_1 = 0,$$

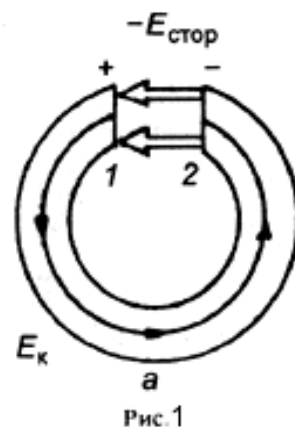
т.е. алгебраическая сумма токов, проходящих через узел, равна нулю. В противном случае в узле происходило бы накопление зарядов.

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.

Сопротивление 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 $\vec{E} = \vec{E}^k + \vec{E}^{стоп}$, и напряжение между точками 1 и 2 может быть записано

$$E_{12} = \int_1^2 \mathbf{E}_e^k dl + \int_1^2 \mathbf{E}_e^{стоп} dl = E_{12}^k + E_{12}^{стоп}, \quad (3)$$

$E_{12}^{стоп}$ - 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

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

Для замкнутой цепи $\varphi_1 = \varphi_2$ и $IR = E^{стоп}$, где $E^{стоп} = \int \mathbf{E}_e^{стоп} dl$ — 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.

Экспериментальная часть

Описание установки.

На рис. 2 представлен общий вид экспериментальной установки для изучения законов постоянного тока. Она состоит из цифрового вольтметра В7-22А и рабочего блока с источниками питания электрических схем. На верхней панели блока находятся пять переключателей (тумблеров) для создания вариантов схем, используемых при выполнении лабораторной работы.

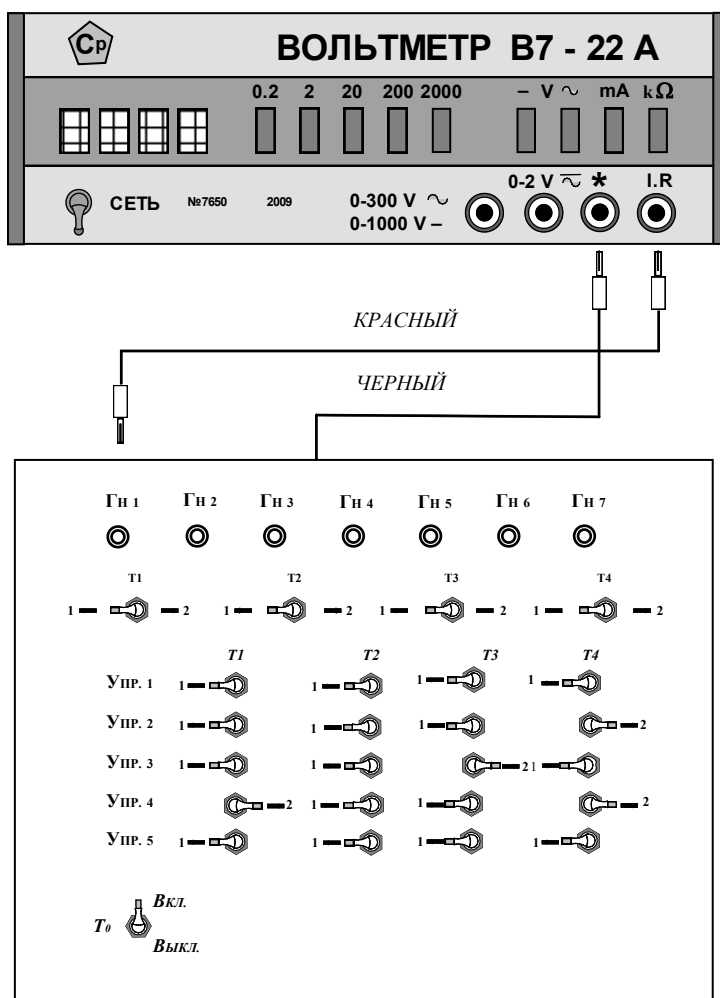


Рис. 2

В состоянии 1 рабочие контакты замкнуты, в состоянии 2 – разомкнуты. Начальное состояние тумблеров при выполнении упражнений указано на верхней панели блока и в соответствующей схеме для каждого упражнения. Т.к. состояния тумблеров при измерении напряжения и тока различно, к каждому упражнению прилагаются две электрические схемы *а* и *б*. Тумблер T_0 соединяет схемы с источниками постоянного напряжения E_1 и E_2 .

Цифровой вольтметр *B7-22A* служит для измерения сопротивлений, токов и напряжений. Для установки прибора в требуемый режим используются клавишные переключатели: $-V\sim$, mA , $k\Omega$ и гнезда для присоединения проводов: ($0-300V\sim$, $0-1000 V-$), (*), (I,R).

Для подключения вольтметра к выбранным участкам схемы установка укомплектована двумя соединительными проводами – черным и красным. Один конец черного провода постоянно находится в гнезде со звездой, другой его конец тумблером $T1$ переключается от одной точки схемы к другой (см. рис. 3 а,б). Красный провод в зависимости от режима измерения подключается к одному из гнезд вольтметра. Другой конец красного провода, оканчивающийся зондом, согласно схеме измерений подключается к одному из гнезд ($\Gamma_{H1}-\Gamma_{H7}$) на верхней панели рабочего блока. Результат измерения высвечивается на четырехразрядном цифровом табло. При измерении напряжения и тока результат высвечивается с учетом знака. Если зонд подключен к точке с низким потенциалом, результат высвечивается со знаком минус (потенциал φ_1 этой точки можно положить равным 0). В противном случае число высвечивается без знака. Эту особенность измерений необходимо учитывать при обработке результатов измерений.

Проведение измерений

Перед измерениями вольтметр и блок питания необходимо подключить к сети $\sim 220 В$.

Упражнение 1.

1. Измерение сопротивлений.

Порядок выполнения упражнения.

Тумблеры на рабочей поверхности блока установить в положения, указанные в строке *Упр. 1*. Тумблер T_0 – в положение *Выкл.* Установить вольтметр в режим измерения сопротивлений (см. рис. 3а). «Утопленные» клавиши отмечены стрелками. Там же указано положение штекера красного провода. Поочередно вставляя зонд в гнезда $\Gamma_H 2$, $\Gamma_H 6$, $\Gamma_H 1$, измерить и записать результаты измерений сопротивлений $R1$, $R2$, $R3$. Для обеспечения хорошего контакта зонд при погружении слегка отклонить от вертикали и прижать к стенке гнезда.

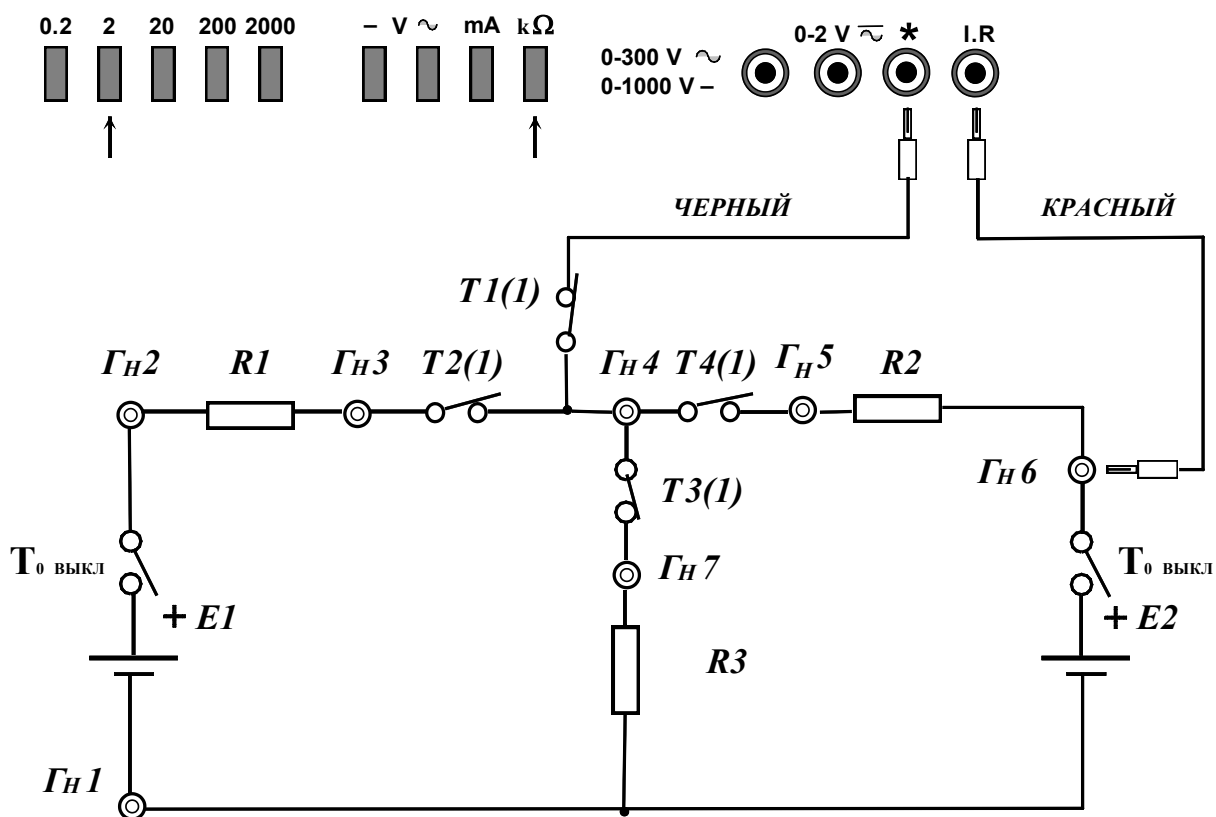


Рис. 3а

После завершения измерений извлекь наконечники красного провода из гнезд установки и вольтметра. Эта процедура выполняется всегда при смене режима работы вольтметра.

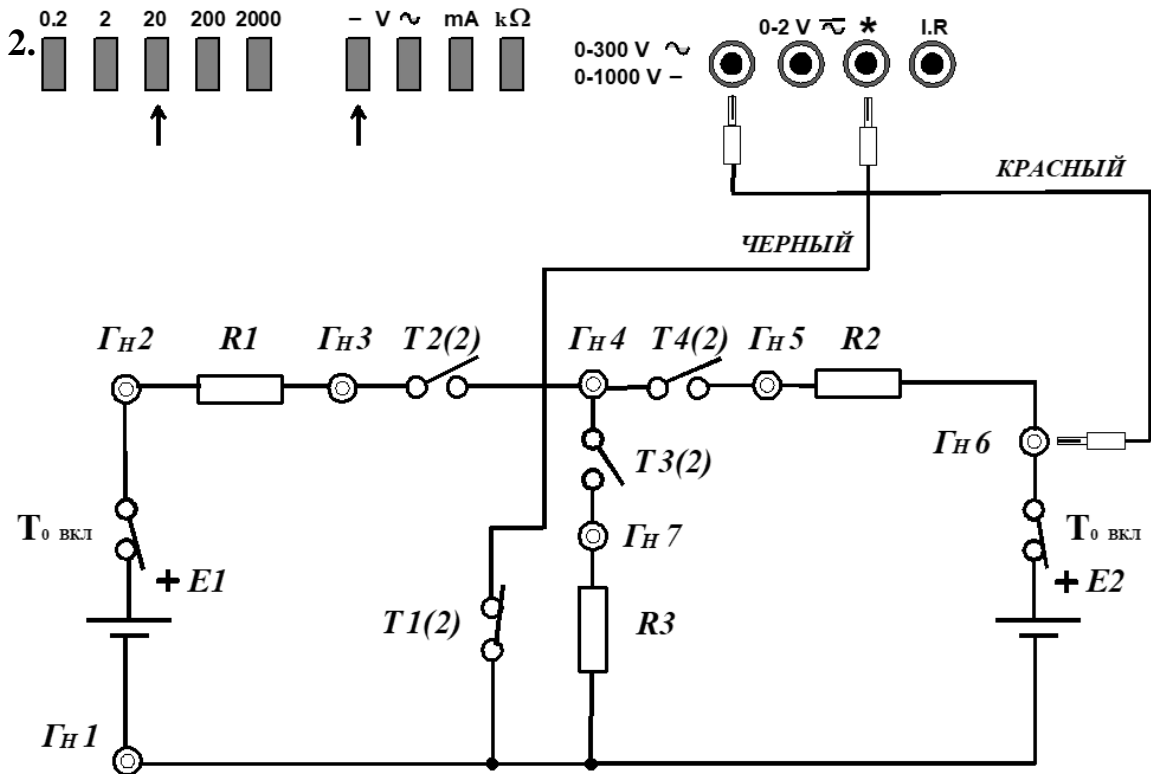


Рис. 3б

2. Измерение ЭДС E_1 , E_2 .

Не изменяя положение тумблера T_0 , установить остальные тумблеры в положения, указанные на рис. 3б. Обратите внимание на то, что конец черного провода в схеме подключен теперь к гнезду $\Gamma_{н1}$. Установить вольтметр в режим измерения напряжений, штекер красного провода вставить в гнездо (0-1000-, см. рис. 3б). Убедиться в том, что схема собрана правильно. Подключить ЭДС E_1 и E_2 к схеме (тумблер T_0 перевести в положение ВКЛ.). Поочередно помещая зонд в гнезда $\Gamma_{н2}$, $\Gamma_{н6}$, измерить и записать с учетом знака ЭДС E_1 , E_2 без нагрузки. Напряжение и ток всегда записывать с учетом знака.

Упражнение 2.

Проверка закона Ома для однородного участка цепи.

1. Измерение напряжения на сопротивлении R_1 .

Режим работы вольтметра остается прежним – измерение напряжений. Положение тумблеров указано на панели блока и рис.4а. Поместить зонд в гнездо $\Gamma_{н2}$, измерить и записать с учетом знака напряжение на сопротивлении R_1 .

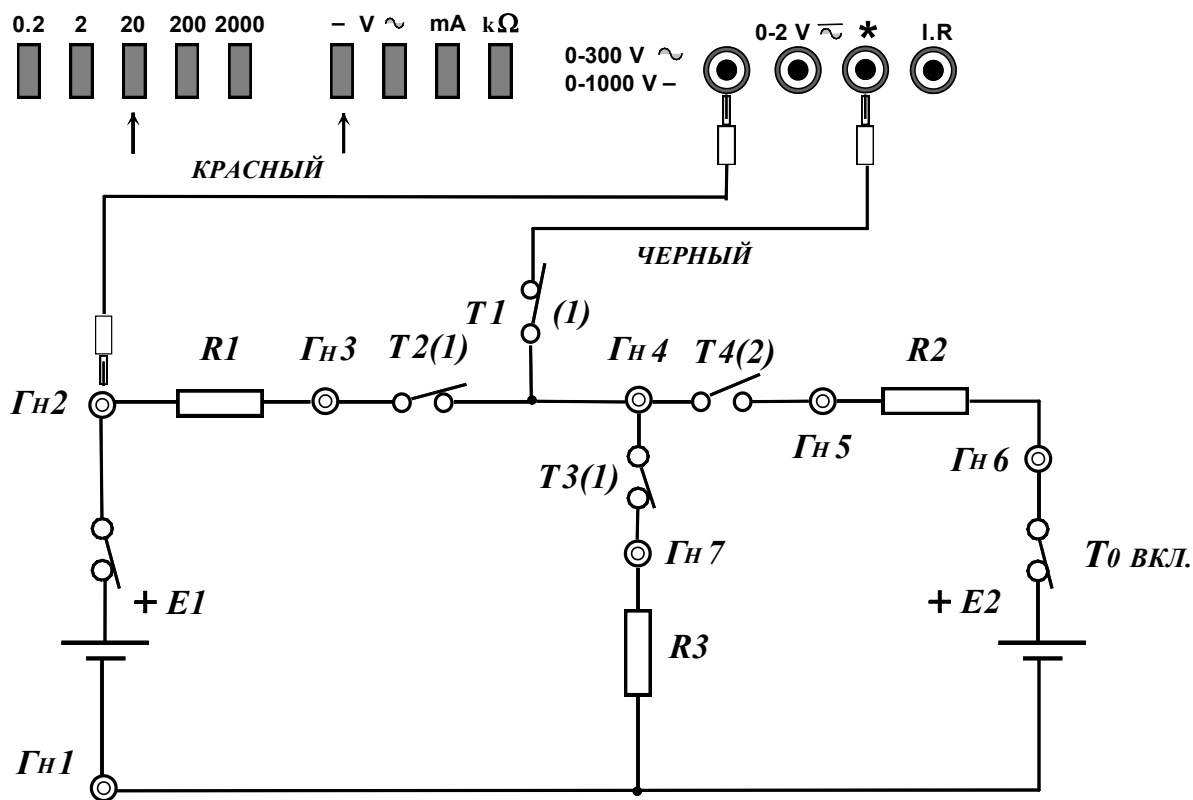


Рис. 4а

Схема рис.4а позволяет так же измерить сопротивление R_1 и по закону Ома для неоднородного участка с одним источником тока E_1 в цепи.

Для этого -

- поместить зонд в гнездо $\Gamma_{н1}$ и измерить разность потенциалов $U_{4-1} = (\varphi_1 - \varphi_2)$.

б) тумблер $T1$ установить в положение 2, поместить зонд в гнездо Γ_{H2} и измерить ЭДС $E_1^\circ = E_1 - r_1$ под нагрузкой. (r_1 – внутреннее сопротивление E_1). Результаты измерений записать.

2. Измерение тока.

Извлечь штеккер красного провода из гнезда вольтметра.

Изменить режим вольтметра и схему измерения (см. рис. 46). Измерить и записать с учетом знака результат измерения тока I_{R1} через сопротивление $R1$.

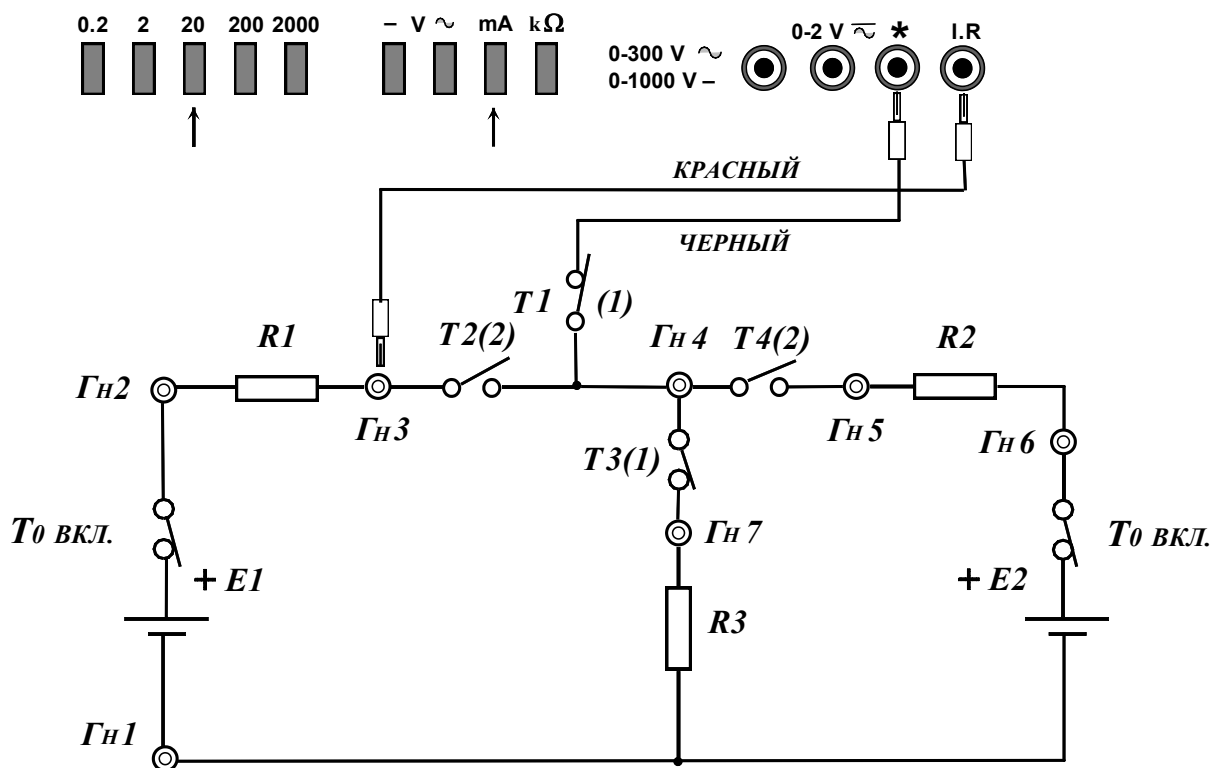
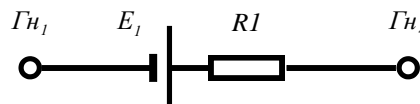


Рис. 46

- По формуле $R_1 = U_{R1}/I_{R1}$ вычислить $R1$, измеренное на однородном участке цепи $\Gamma_{H4} - \Gamma_{H2}$.

- По формуле $IR_1 = (\varphi_1 - \varphi_2) + E_1^\circ = U_{4-1} + E_1^\circ$ вычислить $R1$, измеренное на неоднородном участке цепи.



Упражнение 3.

Проверка закона Ома для неоднородного участка цепи при наличии двух источников тока $E1$ и $E2$ в измерительной цепи.

1. Измерение напряжения.

Установить тумблеры на панели блока в положения для выполнения упражнения 3. Схема измерений приведена на рис. 5а.

а) Измерить и записать с учетом знака разность потенциалов $\Gamma_{н4} - \Gamma_{н1}$ ($U_{4-1} = \varphi_4 - \varphi_1$)

б) тумблер $T1$ установить в положение 2. Поместить зонд в гнездо $\Gamma_{н2}$. Измерить и записать ЭДС E_1° под нагрузкой.

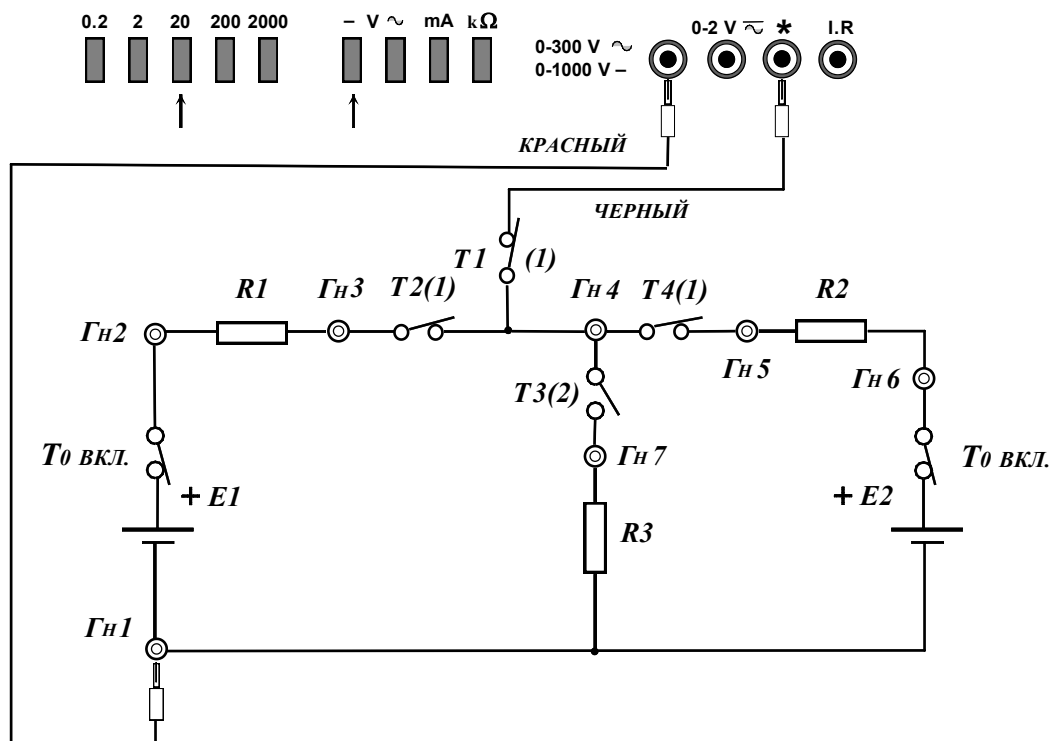


Рис. 5а

2. Измерение тока.

Собрать схему для измерения тока. Схема измерений и режим работы вольтметра приведены на рис. 5б.

Измерить и записать результат измерения тока I на участке $\Gamma_{H4} - \Gamma_{H3}$.

- По формуле $IR_1 = (\varphi_1 - \varphi_2) + E_1^\circ = U_{4,1} + E_1^\circ$ вычислить и записать результат измерения сопротивления R_1 .

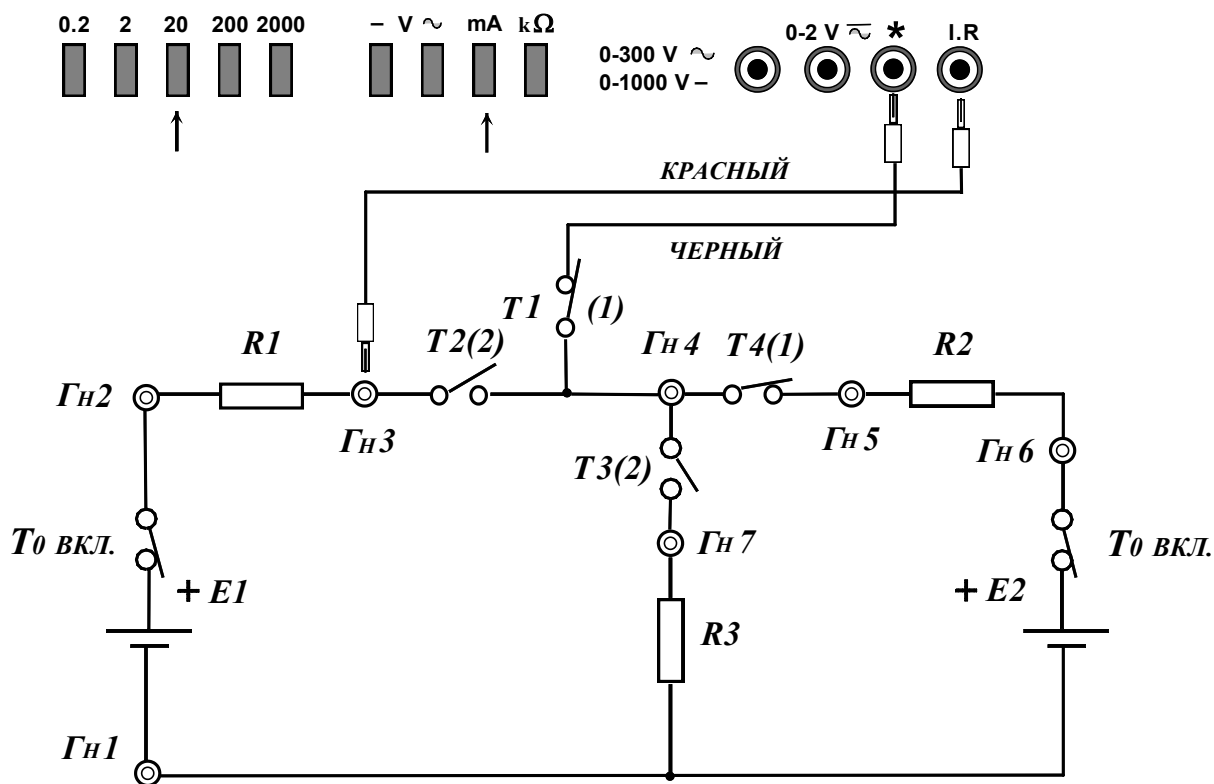


Рис. 5б

Считая результаты измерений сопротивления R_1 в упражнениях 2 и 3 серией экспериментов из трех измерений, вычислить среднее значение R_1 и записать результат вычисления с указанием полной абсолютной и относительной погрешностей.

Упражнение 4

Проверка закона Ома для замкнутой цепи и определение внутреннего сопротивления источника ЭДС $E1$.

1. Измерение напряжения.

Установить тумблеры на панели блока в положения для выполнения упражнения 4. Схема измерений напряжения приведена на рис. 6а.

Измерить и записать результат измерения напряжения $E1^\circ = U_{1,2}$ на участке $\Gamma_{H1} - \Gamma_{H2}$.

2. Измерение тока.

Собрать схему для измерения тока. Схема измерений и режим работы вольтметра приведены на рис. 6б.

Измерить и записать результат измерения тока I и определить его направление.

Полученное значение напряжения на участке $U_{1,2} = \Gamma_{H1} - \Gamma_{H2}$ является падением напряжения во внешней (по отношению к источнику ЭДС) цепи: т.е. на сопротивлениях $R1$ и $R3$. В то же время это значение равно разности потенциалов $U_{1,2}$. Как следует из закона Ома для замкнутой цепи

$$I(R1+R3) = U_{1,2} = E1 - Ir_1,$$

где r_1 – внутреннее сопротивление источника ЭДС $E1$. Эта формула позволяет косвенным способом получить значение внутреннего сопротивления источника ЭДС r_1 , которое нельзя измерить прибором непосредственно. Результат вычисления r_1 записать.

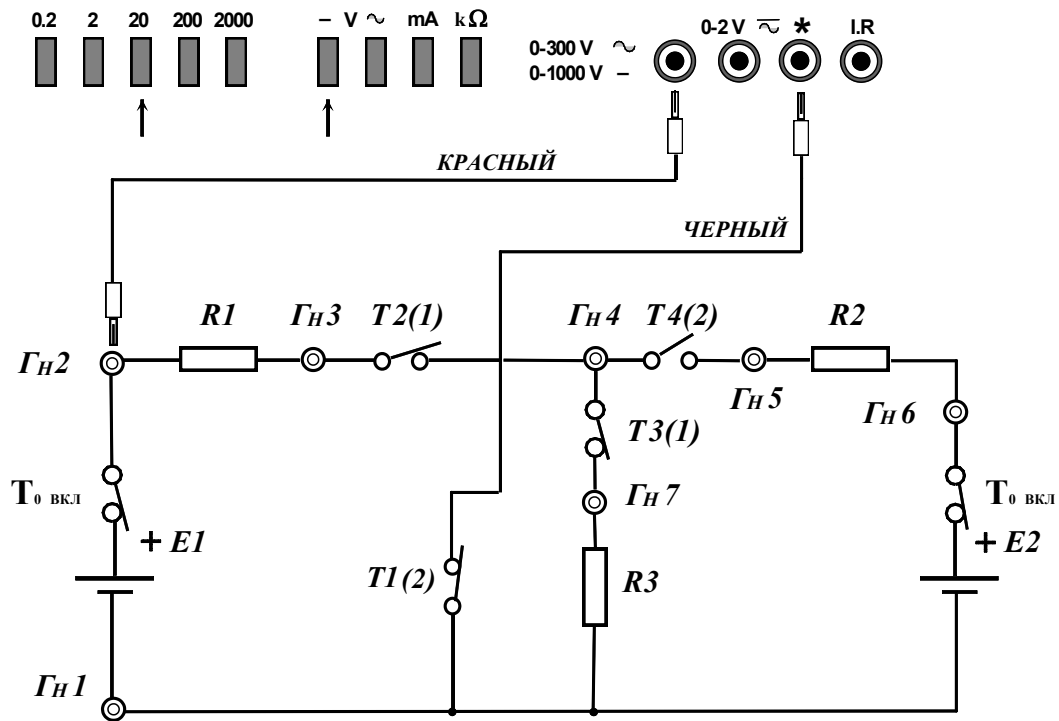


Рис. 6а.

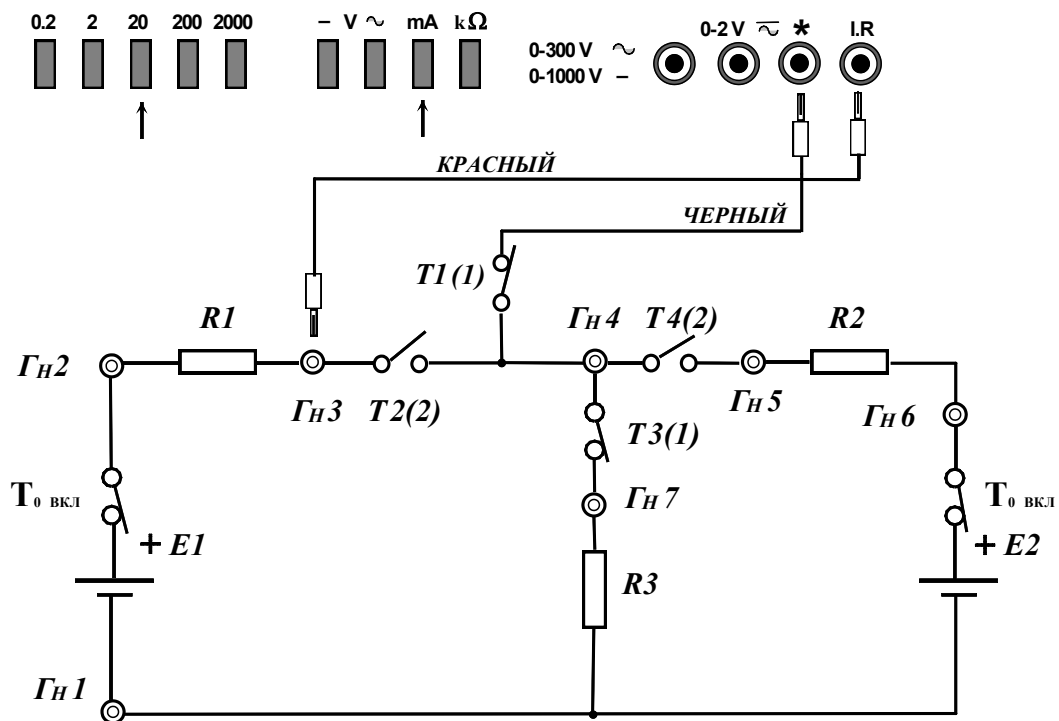


Рис. 6б

Упражнение 5

Проверка правил Киргофа.

1. Измерение напряжений.

Установить тумблеры в положения, указанные на панели блока для упражнения 5.

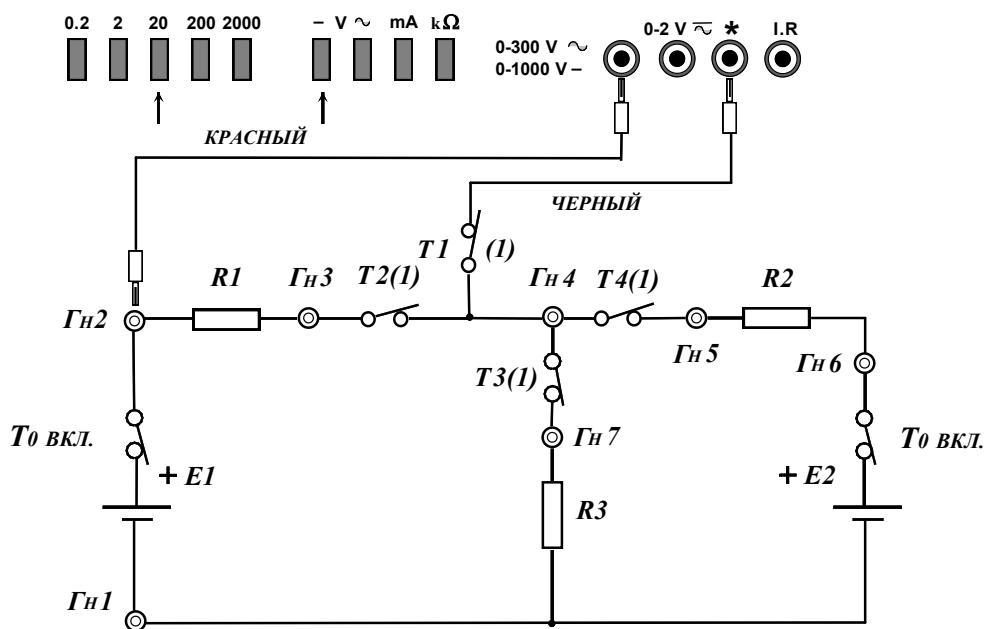


Рис. 7а

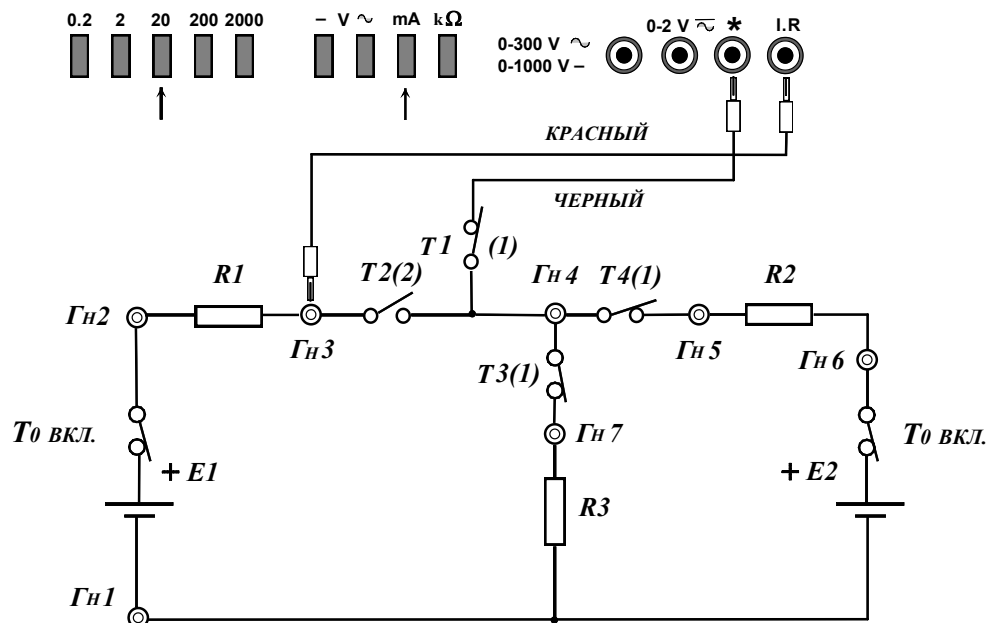


Рис. 7б

Схема измерений напряжений приведена на рис. 7а.

а) Измерить и записать падение напряжений на сопротивлениях $R1$ ($Гн4 - Гн2$), $R2$ ($Гн4 - Гн6$) и $R3$ ($Гн4 - Гн1$).

б) Установить тумблер $Т1$ в положение 2. Помещая поочередно зонд в гнезда $Гн2$ и $Гн6$, измерить и записать значения ЭДС E_1° и E_2° под нагрузкой.

2. Измерение тока.

Собрать схему для измерения токов. Схема измерений и режим работы вольтметра представлены на рис. 7б. Поочередно измерить и записать значения токов $I1$, $I2$, $I3$ через сопротивления $R1$, $R2$, $R3$.

Перерисовать схему с рис.7а в тетрадь и стрелками отметить на схеме направления токов.

а) Произвести проверку 1-го правила Киргофа для одного из узлов

$$\sum I_i = 0.$$

б) Используя измеренные значения напряжений и токов и измеренные значения $R1$, E_1° , E_2° составить с учетом направления токов и направления обхода контура уравнения 2-го правила Киргофа для каждого из трех контуров

$$\sum I_i R_i = \sum U_i = E_i^\circ.$$

Убедиться в справедливости этих уравнений.

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

По окончании работы отключить вольтметр и макетную схему от сети.

Вопросы для самопроверки

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 Киргофа и правило знаков для токов в этом законе.
7. Как формулируется правило знаков для токов и ЭДС в случае замкнутого контура?
8. Сколько уравнений первого закона Ома и сколько уравнений второго закона Ома необходимо записать, чтобы определить максимальное число неизвестных величин в данной разветвленной цепи?

Литература

- Савельев И.В. « Курс общей физики»: Учебное пособие. Кн. 2, «Электричество и магнетизм», Издание 4-е. Москва. Наука. Физматлит. 1998 г.
- 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. Правило Киргофа.