

Лабораторная работа № 210

ПОСТОЯННЫЙ ТОК. ЗАКОН ОМА.

Цель и содержание работы

Целью работы является анализ закона Ома для участка цепи, содержащего проводник и источник тока. Работа заключается в измерении разности потенциалов $\Delta\varphi$ на концах этого участка, установлении связи между разностью потенциалов и силой тока, протекающего по участку, и определении неизвестных величин сопротивлений и ЭДС.

Краткая теория

Упорядоченное движение электрических зарядов называется *электрическим током*. Для того, чтобы свободные заряды находились не только в тепловом, но и в непрерывном упорядоченном движении, необходимо создать внутри проводника электрическое поле. Если это поле электростатическое, то под действием сил такого поля положительные заряды будут двигаться из мест с большим потенциалом в места с меньшим потенциалом, а отрицательные – наоборот. Заряды при этом стремятся к равновесному, статическому расположению, то есть происходит выравнивание потенциала во всем теле проводника.

Для поддержания непрерывного упорядоченного движения свободных зарядов необходимо воспрепятствовать установлению электростатического равновесия. Иначе говоря, помимо электростатических сил, на электрические заряды должны действовать силы не электростатического происхождения. Любые силы не электростатического происхождения получили название *сторонних сил*.

Природа сторонних сил может быть различной. Например, в гальванических элементах и аккумуляторах действуют химические силы электромагнитной природы. Если воспользоваться гидростатической аналогией, то силы электростатического поля можно уподобить силе тяжести, стремящейся выровнять уровни жидкости в сообщающихся сосудах; источник можно сравнить с насосом, работающим против сил тяжести и восстанавливающим разность уровней в сосудах, несмотря на наличие тока жидкости.

С энергетической точки зрения, для создания постоянного тока в замкнутой цепи требуется непрерывная затрата энергии, запасенной в источнике тока. При этом сторонними силами совершается работа по переносу положительных зарядов из мест с меньшим потенциалом в места с большим потенциалом (отрицательных – наоборот). Работа элект-

тростатических сил по переносу зарядов по замкнутой цепи равна, как известно, нулю. В конечном итоге, энергия, запасенная в источнике тока, переходит в джоулево тепло.

Устройства, в которых действуют сторонние силы, называются *источниками тока*. Источники тока характеризуются величиной, называемой *электродвижущей силой* (ЭДС) – $\mathcal{E}$. ЭДС численно равна работе, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда по цепи:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$$

Происхождение сторонних сил можно понять на примере гальванического элемента. Пусть, например, в электролит (водный раствор серной кислоты) опущена цинковая пластинка. Цинк начнет растворяться, и в раствор будут переходить ионы Z_n^{++} . Это происходит потому, что молекулы растворителя (воды) окружают своими отрицательными зарядами атомы металла, отталкивают от них валентные электроны и облегчают переход положительных ионов металла в раствор.

Повышение концентрации ионов Z_n^{++} вблизи пластины и появление разности потенциалов между пластиной и раствором замедляют растворение цинка. В результате на границе цинк–раствор устанавливается динамическое равновесие, и на границе между цинком и раствором образуется скачок потенциала.

Если теперь в электролит погрузить пластину из другого металла, например меди, и соединить ее проволокой с цинковой пластиной, то лишние электроны уйдут из цинка через медь в раствор и понизят имеющуюся между цинком и раствором разность потенциалов. В результате растворение цинка возобновиться, и из цинка в раствор вновь начнут поступать ионы Z_n^{++} . Работа химических сил будет непрерывно восстанавливать скачок потенциала. Аналогичный скачок потенциала возникает на границе медь–раствор.

Распределение потенциала в цепи гальванического элемента представлено на рис. 1. При разомкнутой цепи (рис. 1а) потенциал внутри металлических электродов, проводов и в толще электролита, где нет сторонних сил, постоянен. В тонких же пограничных слоях электрод-раствор существуют сторонние, силы, вызывающие резкие скачки потенциала $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$. Сумма этих скачков представляет собой полную ЭДС элемента: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$. Она равна разности потенциалов между точками 1 и 2.

При замыкании точек 1 и 2 получается распределение потенциала, показанное на рис. 1б. В этом случае разность потенциалов между точками 1 и 2 не равна сумме: $\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$ (см. формулу (1)).

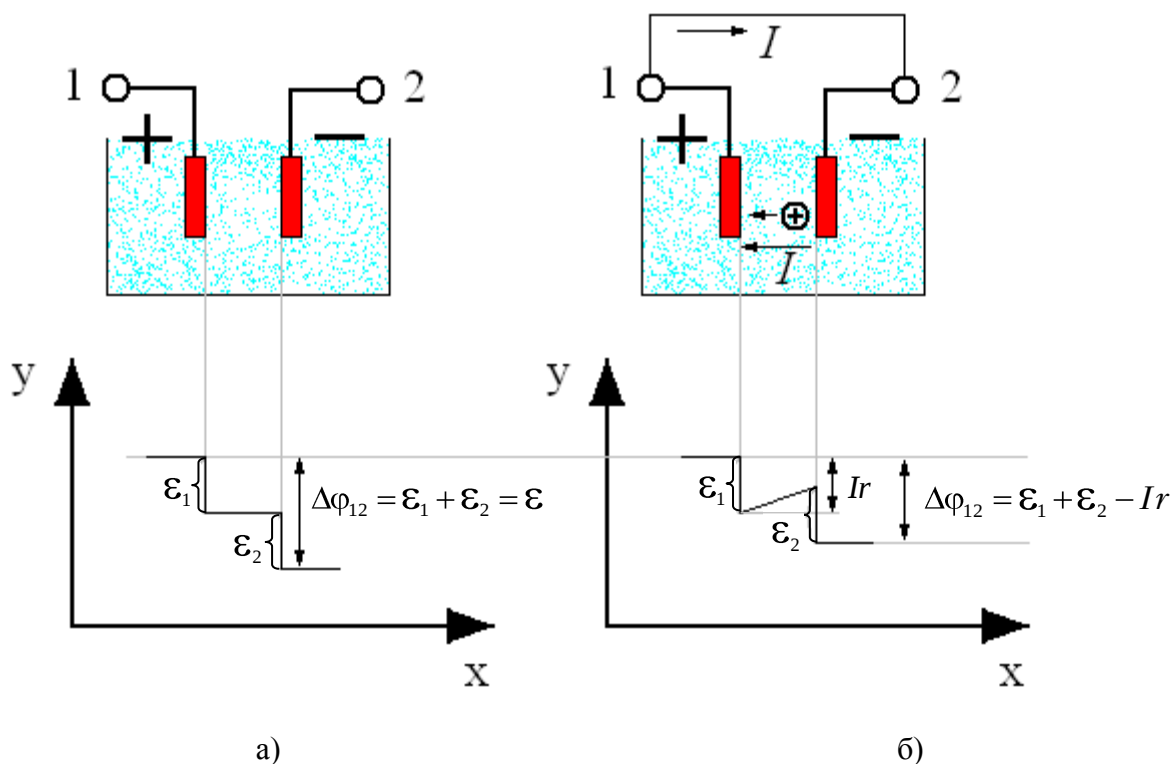
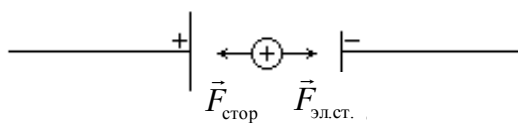


Рис. 1

Заряды в замкнутой цепи движутся кругообразно: во внешней цепи положительные заряды перемещаются от положительного электрода к отрицательному, а внутри источника – наоборот: от отрицательного электрода к положительному. Движение зарядов во внешней цепи происходит под действием электростатических сил. Внутри источника заряды движутся под действием как электростатических, так и сторонних сил. Сторонние силы направлены против электростатических и действуют на положительный заряд в направлении от отрицательного электрода к положительному.



Рассмотрим различные участки цепи: однородный (рис. 2а) и неоднородный, то есть содержащий источник тока (рис. 2б).



Рис. 2

На однородном участке цепи заряды движутся только под действием электростатических сил. *Разность потенциалов* на концах однородного участка численно равна работе электростатических сил по переносу положительного единичного заряда по участку:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}^{\text{эл.ст}}}{q}$$

На неоднородном участке заряды переносятся как электростатическими, так и сторонними силами. Величина, численно равная работе тех и других сил по переносу положительного единичного заряда на участке, называется *падением напряжения* или *напряжением* на данном участке:

$$U_{12} = \frac{A_{12}^{\text{эл.ст}} + A_{12}^{\text{стор}}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12} \quad (1)$$

На однородном участке падение напряжения U_{12} совпадает с разностью потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ на концах участка.

По закону Ома сила тока, текущего по проводнику, пропорциональна напряжению на проводнике:

$$I = \frac{U_{12}}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \quad - \quad \text{однородный участок;}$$

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}}{R} \quad - \quad \text{неоднородный участок.}$$

Для замкнутой цепи $\Delta\varphi = 0$ и закон Ома приобретает вид:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

Если на участке цепи или в замкнутой цепи имеется несколько источников тока, то $\mathcal{E}_{12} = \sum_i \mathcal{E}_i$ – алгебраическая сумма ЭДС отдельных источников; R – полное сопротивление участка или всей цепи, равное сумме внутренних и внешних сопротивлений. Закон Ома для неоднородного участка цепи можно тогда записать в виде:

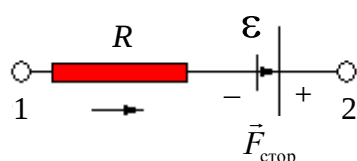
$$I \sum_i R_i = (\varphi_1 - \varphi_2) + \sum_i \mathcal{E}_i \quad \text{или} \quad \Delta\varphi_{12} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = \mathcal{E} \quad (2)$$

При практическом использовании закона Ома (2) для неоднородного участка цепи следует соблюдать следующее правило знаков.

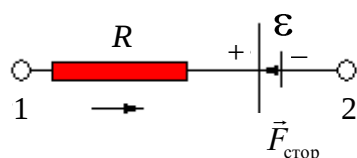
Нужно обходить участок от точки 1 с потенциалом φ_1 к точке 2 с потенциалом φ_2 . Если направление тока совпадает с направлением обхода, то I в (2) берется со знаком «+». В противном случае – со знаком «-». Если направление сторонних сил, действующих на положительный заряд, в источнике совпадает с направлением обхода (источник при этом способствует движению положительных носителей в направлении обхода), то $\mathcal{E}$ этого источника берется со знаком «+». В противном случае – со знаком «-».

Строгое обоснование этих правил дано в учебнике [1].

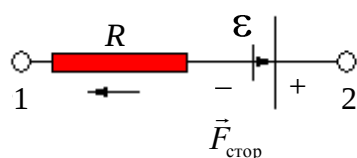
Правила выбора знаков проиллюстрированы на рис. 3.



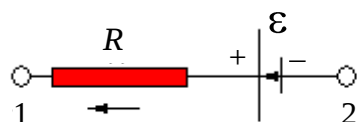
$$\text{a) } IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}$$



$$\text{б) } IR = (\varphi_1 - \varphi_2) - \mathcal{E}$$



$$\text{в) } -IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}$$



$$\text{г) } -IR = (\varphi_1 - \varphi_2) - \mathcal{E}$$

Рис. 3.

Рассмотрим разветвленную электрическую схему, показанную на рис. 4., в которой имеется два источника тока с ЭДС $\mathcal{E}$ и $\mathcal{E}_x$, сопротивления – переменное R и два постоянных R_1 и R_2 (которые могут быть включены в цепь независимо), амперметр A и вольтметр V . Будем считать, что сопротивление вольтметра достаточно велико, так что силой тока I_2 , текущего через вольтметр, можно пренебречь.

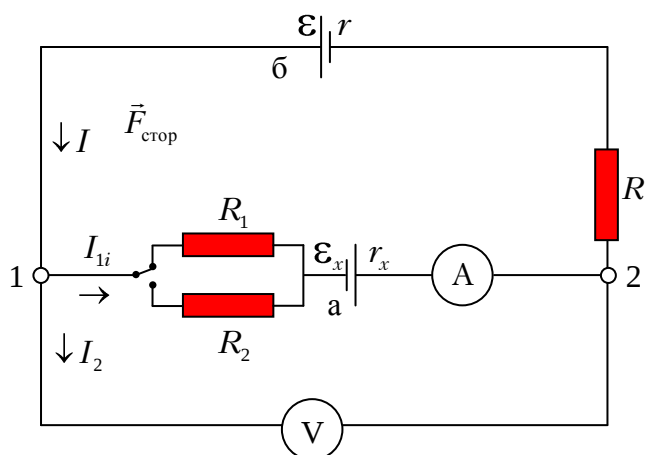


Рис. 4

Следовательно, в соответствии с законом Ома:

$$I_{1i} \approx I \approx \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}_x}{R + R_i + r + r_x + R_A} \quad (3)$$

Внутренние сопротивления источников тока r и r_x и сопротивление амперметра R_A будем считать пренебрежимо малыми по сравнению с R и R_i , тогда сила тока в цепи 1a2 равна приближенно:

$$I \approx \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}_x}{R + R_i} \quad (4)$$

Разность потенциалов на концах участка 1–2, в соответствии с (2), равна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = IR_i - \mathcal{E}_x \quad (5)$$

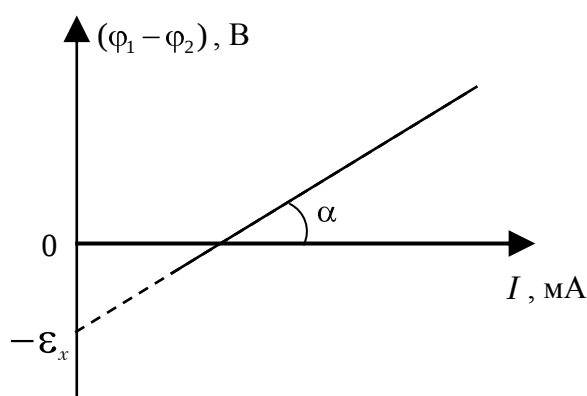


Рис. 5.

Из выражения (5) видно, что разность потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ линейно связана с силой тока I . График зависимости $(\varphi_1 - \varphi_2)$ от I показан на рис. 5. Распределение потенциала в рассматриваемой замкнутой цепи 1a2б показано на рис. 6. В зависимости от величины силы тока I , $(\varphi_1 - \varphi_2)$ может оказаться больше нуля (> 0), меньше (< 0) и равной 0. При этом ток в цепи протекает в одном и том же направлении, меняется лишь его величина.

Разность потенциалов на каком-либо участке цепи может быть измерена с помощью вольтметра, провода от которого подключаются при этом к концам рассматриваемого участка. Следует помнить, что, если участок однородный, разность потенциалов, показываемая вольтметром, будет равна напряжению на этом участке. Если же участок неоднородный, разность потенциалов не будет равна напряжению (см. формулу (1)).

Если один из проводников, идущих от вольтметра, присоединить к некоторой точке цепи (например, к точке 1 на рис. 4) и условно считать потенциал этой точки равным нулю, а второй провод от вольтметра подсоединять к другим точкам цепи, то можно найти потенциалы этих различных точек и построить график распределения потенциала.

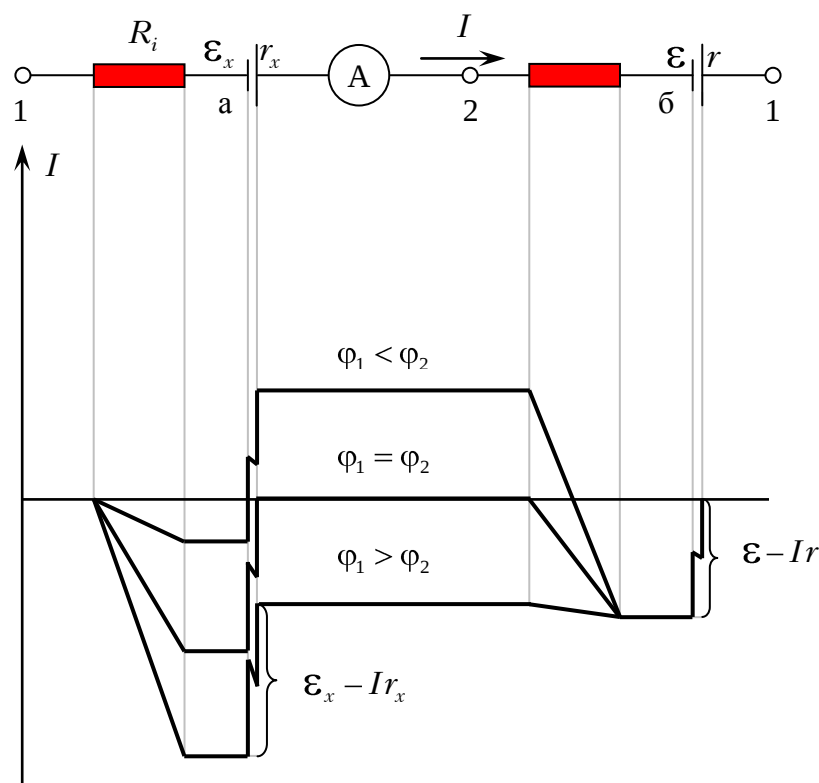


Рис. 6.

Приборы и принадлежности, необходимые для выполнения работы.

Принципиальная схема электрической цепи, исследуемой в данной работе, приведена на рис. 4. Здесь $\mathcal{E}$ – источник постоянного тока; $\mathcal{E}_x$ – элемент, неизвестная величина ЭДС которого определяется в работе; R – переменное сопротивление, служащее для изменения силы тока в цепи; R_1 и R_2 – постоянные сопротивления, неизвестные величины которых определяются в работе; A и V – цифровые мультиметры, которые в данной работе используются в качестве амперметра и вольтметра, соответственно.

Сопротивления R_1 или R_2 вводятся в схему с помощью тумблера.

Порядок выполнения работы

1. Не включать приборы до тех пор, пока схема не будет проверена преподавателем или лаборантом.
2. Включить мультиметры A и V и источник напряжения $\mathcal{E}$ в сеть.
3. Вращая ручку переменного сопротивления, установить ее в одно из крайних положений так, чтобы сила I тока была максимальной. На шкале вольтметра перед цифрами должен появиться знак «+». Показания вольтметра и амперметра записать в первый столбец таблицы 1.

4. Повернуть ручку переменного сопротивления в другое крайнее положение. При этом перед цифрами на вольтметре должен появиться знак «-». Записать показания вольтметра (со знаком) и амперметра в последний столбец таблицы 1.

5. Найти разность показаний амперметра в двух предыдущих измерениях и разделить полученное число на 10. Таким образом, мы найдем тот шаг, с которым следует менять силу тока, чтобы получить на графике $\Delta\varphi$ от I 10–12 точек. (Величина шага не обязательно должна быть точной, ее можно округлить до двух значащих цифр).

6. Поворачивая ручку переменного сопротивления каждый раз так, что изменение тока соответствует величине определенного выше шага, измерять разность потенциалов и соответствующую силу тока. Данные записать последовательно в таблицу 1.

Таблица 1.

I , мА										
$\Delta\varphi_{12}$, В										

7. Ввести с помощью тумблера второе неизвестное сопротивление. Произвести измерения (см. пп. 3–5). Данные занести в табл. 2.

Таблица 2.

I , мА										
$\Delta\varphi_{12}$, В										

Обработка результатов измерений

1. Построить графики зависимости разности потенциалов от силы тока в цепи для 1-го и 2-го неизвестных сопротивлений. Продолжить их до пересечения с вертикальной осью.

2. Определить по наклону прямых величины сопротивлений, а по точке пересечения прямых с осью y – величину ЭДС $\mathcal{E}_x$.

3. Записать результаты в виде:

$$\overline{\mathcal{E}_x} = \dots \text{В}$$

$$R_1 = \dots \text{кОм}, R_2 = \dots \text{кОм}$$

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим током? Силой тока? Плотностью тока? Напишите выражения, связывающие силу и плотность тока с зарядом, протекающим по проводнику.
2. Какие силы называются сторонними? На каких участках цепи они действуют в случае гальванического элемента? Объясните происхождение сторонних сил на примере гальванического элемента.
3. Расскажите о превращениях энергии в замкнутой электрической цепи.
4. Дайте определение разности потенциалов, электродвижущей силы и напряжения. Напишите выражения, связывающие эти величины с работой электростатических и сторонних сил.
5. Напишите закон Ома для случаев: однородного участка; неоднородного участка; замкнутой цепи.
6. Расскажите о правилах выбора знаков при записи закона Ома для неоднородного участка цепи. Приведите примеры.
7. Нарисуйте график распределения потенциала: для замкнутой цепи $1a2б$, используемой в данной работе; для участка $1a2$.
8. Нарисуйте графики распределения потенциала для гальванического элемента, если электроды: а) разомкнуты, б) замкнуты.
9. Расскажите, на каких участках исследуемой цепи заряды движутся под действием: электростатических сил; сторонних сил.
10. Покажите, используя формулы (4) и (5), при каком соотношении между сопротивлениями R_1 и R_2 и ЭДС $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ разность потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ будет больше нуля? меньше нуля? равна нулю?
11. Как по графику зависимости разности потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ от тока I определить сопротивление участка и ЭДС, действующей на этом участке.

Литература

1. Савельев И. В. Курс общей физики. т.2.
2. Калашников С. Г. Электричество.