

## Лабораторная работа 2.4. Применение закона Ома для цепей постоянного тока (см также с.106 «Практикума»)

### Экспериментальные задачи, поставленные в работе:

- определить значения двух неизвестных сопротивлений методом амперметра-вольтметра, используя закон Ома, с учетом сопротивления измерительных приборов,
- определить ЭДС и внутреннее сопротивление двух источников с помощью закона Ома,
- экспериментально проверить применимость закона Ома для неоднородных электрических цепей, содержащих два источника ЭДС,
- изучить распределение потенциала и построить потенциальную диаграмму для такой цепи.

### Введение.

Георг Ом в 1827 году экспериментально установил закон, согласно которому отношение разности потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  на концах проводника к силе тока  $I$  в этом проводнике при неизменных внешних условиях есть величина постоянная. Эту величину называют электрическим сопротивлением проводника  $R$ . Часто закон Ома записывают в виде:

$$I = U/R, \quad (1)$$

где  $U = \varphi_1 - \varphi_2$  называют электрическим напряжением. Эту форму записи называют законом Ома для однородного (не содержащего источников ЭДС) участка цепи или просто: для участка цепи.

Напомним, что ЭДС (электродвижущая сила) это физическая величина, характеризующая энергию источника, способную создавать и поддерживать электрический ток в цепи. Так же как и потенциал, ЭДС измеряется в Вольтах. Второй характеристикой источника является его внутреннее сопротивление  $r$ . Подробнее характеристики источников исследуются при выполнении работы 2.5.

Участок цепи, содержащий источник ЭДС, называется неоднородным (рис.1).

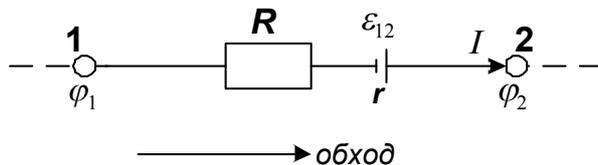


Рис.2.4.1.

В данном случае ток на участке создаётся внешним источником, который на рисунке не показан, так как предполагается, что нам известен результат его действия, т.е. сила тока на участке.

Разность потенциалов между точками 1 и 2 будет равна алгебраической

сумме напряжения на однородном участке и ЭДС ( $\mathcal{E}$ ), т.е. имеет место соотношение:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = I R_{12} \pm \mathcal{E}, \quad (2)$$

где  $R_{12}$  - сопротивление участка цепи между точками 1 и 2, равное в данном случае сумме сопротивления резистора  $R$  и внутреннего сопротивления  $r$  источника. Это выражение называют законом Ома для неоднородного участка цепи.

Знак перед  $\mathcal{E}$  определяют следующим образом. Вначале произвольно выбирается положительное направление тока. ЭДС считается положительной, если при обходе участка в том же направлении мы проходим «внутри» источника от отрицательного полюса к положительному.

Если при расчете значение тока окажется положительным, то предположение об его направлении было верным, если вычисленный ток окажется отрицательным, то его реальное направление на данном участке цепи противоположное.

Например, для неоднородного участка, показанного на рис.2.4.1, направление тока выбрано от точки 1 к точке 2 (т.е. от  $\varphi_1$  к  $\varphi_2$ ). Тогда:

$$I(R + r) = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}$$

Для полной (замкнутой) неразветвленной цепи точки 1 и 2 совпадают и  $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ . В этом случае выражение (2) принимает вид:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (3)$$

Полученное соотношение (3) называется законом Ома для полной цепи. В такой форме он позволяет определить силу тока, который может быть создан источником, включенным в данную цепь. Если неоднородный участок цепи (или полная цепь) содержит несколько источников ЭДС, то в числителе выражения (3) должна стоять алгебраическая сумма всех ЭДС, знаки которых выбираются в соответствии с описанным правилом знаков.

**Распределение потенциала вдоль** электрической цепи принято отображать в виде **потенциальной диаграммы - графика**, по **горизонтальной оси** которого откладываются значения сопротивления цепи, измеренные от некоторой исходной точки, а по **вертикальной** - значения потенциала в соответствующем месте цепи относительно той же исходной точки. В замкнутой цепи в качестве этой точки обычно выбирают отрицательный полюс источника ЭДС. Потенциал второго полюса (напряжение на выводах источника) будет равен  $\varphi_2 = \mathcal{E} - I r$ . **Далее вдоль цепи потенциал продолжает снижаться. Наличие других источников ЭДС приводит к скачкам потенциала, равным соответствующим ЭДС. После обхода всей цепи потенциал обращается в ноль.**

В разомкнутой цепи ток отсутствует и, соответственно, падения напряжения **вдоль цепи** равны нулю. Поэтому на концах разомкнутой цепи

разность потенциалов равна алгебраической сумме всех входящих в нее ЭДС.

В этом состоит потенциальная опасность электрического оборудования, постоянно подключенного к электрической сети, даже если оно в данный момент не работает. Именно поэтому в Правилах техники безопасности такое оборудование продолжают называть действующим и рекомендуют использовать выключатели, размыкающие оба провода, идущие к электросети, а при длительных перерывах в работе выключать электрические приборы из розеток.

### ***Описание экспериментальной установки.***

При выполнении данной работы студенты самостоятельно собирают несколько экспериментальных установок (электрических схем) для решения поставленных задач с использованием закона Ома для определения одного из параметров цепи, если остальные известны.

В задании 1 требуется определить величину неизвестного сопротивления методом амперметра-вольтметра с учетом сопротивления измерительных приборов, используя закон Ома для однородного участка цепи.

Два варианта схемы для таких измерений представлены на рис. 2.4.2 (с.108 Практикума). В качестве источника используется выпрямитель ВС-4-12». Реостат, обозначенный как П, предназначен для регулировки измерительного тока. В качестве измерительных приборов используются приборы серии М2000. Они являются универсальными (в том смысле, что они могут измерять **как напряжение, так и силу тока**) и многопредельными. Вид и предел измерений зависят от того, к каким клеммам прибора присоединены измерительные провода, а также от положения переключателей на панелях приборов.

В комплект оборудования входят два резистора, сопротивление которых необходимо определить. Обратите внимание на то, что они отличаются по цвету. Эти резисторы на рис. 2.4.2 обозначены как R, на остальных как R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub>. При выполнении работы их удобно записывать как R(кр) и R(зел).

**При выполнении этого задания закон Ома** используется для расчетов величины R<sub>x</sub>, а также **для** определения сопротивления приборов, когда сам измерительный прибор рассматривается как участок цепи.

В задании 2 требуется определить ЭДС и внутреннее сопротивление источников с помощью закона Ома для неоднородного участка цепи.

Схема эксперимента представлена на рис 2.4.3. Учитывая то, что сопротивление выпрямителя мало по сравнению с сопротивлением внешнего резистора, для большей наглядности эксперимента в цепь включен дополнительный резистор r<sub>доп</sub>, который и следует рассматривать как сопротивление источника.

Для рассматриваемого участка цепи можно записать:

$$U = \varepsilon - I(r + R_A),$$

где  $U$  и  $I$  – показания вольтметра и амперметра, соответственно. Поскольку в данном уравнении два неизвестных  $\varepsilon$  и  $r$ , то необходимо произвести измерения тока и напряжения дважды (один раз включив в цепь сопротивление  $R_1$ , и второй раз - сопротивление  $R_2$ ). Получим систему из двух уравнений, которую можно решить относительно  $\varepsilon$  и  $r$ .

В качестве  $r_{\text{доп}}$  при выполнении этого и последующего заданий используются два остеклованных проволочных резистора, которые входят в комплект оборудования.

Перечисленные выше приборы и устройства используются и для выполнения задания 3 по проверке применимости закона Ома для расчета параметров электрических цепей, содержащих несколько источников и внешних сопротивлений. Схема соответствующей электрической цепи представлена на рис. 2.4.4. Подключение вольтметра на ней указано пунктиром, так как при выполнении этого задания он подключается к различным точкам цепи, указанным цифрами 1 – 7.

**Подготовка протокола к работе** (Выполняется перед получением допуска к работе).

Запишите в тетради номер и название работы.

Запишите номер и цель задания 1.

Зарисуйте схему рис. 2.4.2а, исключив из неё ключ, т.к. конструктивно он входит в состав выпрямителя.

В данной схеме амперметр измеряет общий ток, протекающий через вольтметр и измеряемое сопротивление, а вольтметр – только напряжение на этом же сопротивлении.

**Выведите формулу для расчетов  $R_X$ . Для этого вначале запишите закон Ома для участка цепи, содержащего только этот резистор:  $R_X = U_R / I_R$ . Здесь и в дальнейшем при использовании закона Ома для каждого конкретного случая рекомендуется записывать входящие в него величины вместе с индексами, обозначающими соответствующий участок. (Примеры см. ниже). Такая запись поможет избежать путаницы в применении закона Ома для разных участков.**

**Величину  $I_R$  можно определить как разность  $I_A - I_V$ . В свою очередь  $I_V = U_V / R_V$ . Исходными данными для расчета сопротивления вольтметра  $R_V$  служат  $U_V$  – используемый предел измерения прибора ( $U_{\text{МАКС}}$ ) и соответствующее ему значение силы тока. Чтобы определить силу тока при  $U_{\text{МАКС}}$ , нужно в верхней строке таблицы на шкале прибора найти установленное переключателями значение  $U_{\text{МАКС}}$  и под ним в нижней строке прочитать значение тока, т.е.  $R_V = U_{\text{МАКС}} / I_{\text{ТАБЛ}}$ .**

Запишите **полученные** формулы с **расшифровкой** всех обозначений.

Подготовьте таблицу для записи условий эксперимента и результатов измерений. Здесь и далее индекс «ед» означает запись показаний соответствующих приборов в единицах шкалы.

I, ед	I, мА	U, ед	U, В	U <sub>МАКС</sub> , В	I <sub>ТАБЛ</sub> , А	R <sub>V</sub> , Ом	R <sub>КР</sub> , Ом	ΔR <sub>КР</sub> , Ом
Среднее								

Зарисуйте схему рис. 2.4.2б, исключив из неё ключ.

В этом случае вольтметр будет показывать общее падение напряжения на амперметре и сопротивлении, **а амперметр – силу тока только через искомое сопротивление.**

Выведите формулу для вычисления R<sub>X</sub> по аналогии с выводом предыдущей формулы. **Обратите внимание, что сопротивление амперметра в этом случае определяется как R<sub>A</sub>=U<sub>ТАБЛ</sub>/I<sub>МАКС</sub>.** Запишите итоговую формулу с расшифровкой всех обозначений

Подготовьте таблицу для записи условий эксперимента и результатов измерений:

I, ед.	I, мА	U, ед.	U, В	I <sub>МАКС</sub> , А	U <sub>ТАБЛ</sub> , В	R <sub>A</sub> , Ом	R <sub>ЗЕЛ</sub> , Ом	ΔR <sub>ЗЕЛ</sub> , Ом
Среднее								

Запишите номер и цель задания 2.

Зарисуйте схему рис. 2.4.3, исключив из нее ключ и заменив резистор R<sub>1</sub>(R<sub>2</sub>) на реостат.

Запишите систему уравнений для определения ε и r<sub>ДОП</sub>, обозначив в 1-м уравнении показания приборов при первом измерении как U<sub>1</sub> и I<sub>1</sub>, а во 2-м уравнении показания при втором измерении и как U<sub>2</sub> и I<sub>2</sub>. Выведите и запишите формулу для вычисления ε. Запишите формулу для определения r<sub>ДОП</sub> после подстановки ε в любое из уравнений системы. Запишите расшифровку всех обозначений в формулах.

Подготовьте таблицу для записи условий эксперимента и результатов измерений:

№ измерения	I, ед.	U, ед.	I, мА	U, В	ε, В	r <sub>ДОП</sub> , Ом
-------------	--------	--------	-------	------	------	-----------------------

1						
2						
3						
4						

Запишите номер и цель задания 3.

Зарисуйте в тетради схему рис. 2.4.4. Обратите внимание на то, что дополнительные сопротивления на ней обозначены как  $r_1$  и  $r_2$ .

Запишите формулы для расчетов:

- силы тока  $I(z)$ , напряжения на участках 1-4 и 4-7  $U_{1-4}(z)$ ,  $U_{4-7}(z)$  при замкнутом ключе и отключенном вольтметре и сопротивлениях участков 1-2 и 4-5, равных нулю.

- напряжения на тех же участках  $U_{1-2}(p)$   $U_{4-7}(p)$  при разомкнутом ключе и подключенном к этим участкам вольтметре.

Подготовьте таблицу для записи результатов измерений и расчетов.

	$I(z)$		$U_{1-4}(p)$		$U_{4-7}(p)$		$U_{1-4}(z)$		$U_{4-7}(z)$	
Расч.	... мА		... В		... В		... В		... В	
Эксп.	ед	мА	ед	В	ед	В	ед	В	ед	В

Запишите номер и цель задания 4.

Подготовьте таблицу исходных данных для построения потенциальных диаграмм.

Участки	$U(z)$ , ед	$U(z)$ , В	$R_{\Sigma}$ , Ом
1-2			0
1-3			
1-4			
1-5			
1-6			
1-7	0	0	

После таблиц напишите заголовок «Расчеты к заданию 1». После выполнения соответствующих расчетов, аналогичные заголовки необходимо будет сделать и для последующих заданий.

Подготовьте лист миллиметровой бумаги для построения потенциальных диаграмм при выполнении задания 5.

### ***Измерения и обработка результатов***

***Задание 1.*** Определение сопротивлений резисторов методом амперметра-вольтметра.

Соберите цепь по схеме, нарисованной в тетради для этого задания, включив в нее в качестве  $R$  неизвестный резистор красного цвета. При сборке можно использовать любой из двух предложенных выпрямителей. **В качестве**

ключа К в данном случае используется тумблер «Сеть», который расположен на лицевой панели выпрямителя. Рекомендуется 1-м шагом собрать цепь без вольтметра, а 2-м шагом подключить вольтметр к нужным точкам цепи. Соблюдайте правильную полярность подключения приборов.

В зависимости от рабочего места в работе используются разные приборы. В качестве вольтметров – это приборы М2018 и М2017. М2018 включается в цепь через зажимы «-» и «VA», а М2017 - через зажимы «-» и «V». В качестве миллиамперметров – это приборы М2020 и М2015. Они включаются в цепь через зажимы «-» и «A».

Установите при помощи переключателей рода работ приборов (с учетом положения переключателя «множитель шкалы») пределы измерений, близкие к 1А для амперметра и 12В для вольтметра.

Установите движок реостата в среднее положение. Пригласите лаборанта или преподавателя для проверки правильности собранной цепи.

После проверки включите источник питания.

Оцените, на какую часть шкалы отклонилась стрелка вольтметра. Для повышения точности измерений нужно, чтобы она при измерениях устанавливалась в правой части шкалы как можно ближе к концу. Если это не выполняется, выключите выпрямитель, установите другой предел измерений вольтметра, включите выпрямитель и вновь проверьте выполнение этого условия. Выбранный предел измерений вольтметра запишите в таблицу как  $U_{\text{МАКС}}$ .

При необходимости аналогичным образом установите нужный предел измерений миллиамперметра.

Проведите отсчет показаний приборов. Для повышения точности отсчёта приборы снабжены зеркальной шкалой. Отсчёт нужно проводить, располагая глаза так, чтобы стрелка «совпадала» с её отражением.

Запишите в таблицу показания приборов в единицах шкалы.

Сдвиньте движок реостата на 2-3 см в любую сторону и повторите измерения с записью показаний приборов во вторую строчку таблицы.

Сдвиньте движок реостата на 4-5 см в другую сторону и снова повторите измерения с записью в третью строку таблицы.

Выключите источник.

Рассчитайте цену единицы шкалы вольтметра и пересчитайте его показания в Вольты с записью в таблицу.

Аналогичным образом пересчитайте показания миллиамперметра.

Определите и запишите как  $I_{\text{ТАБЛ}}$  ток полного отклонения вольтметра, соответствующий установленному пределу измерений. Для прибора М2017 он указан в нижней части шкалы. Для прибора М2018 - в нижней строке таблицы на шкале напротив используемого при измерениях положения переключателя множителя шкалы.

Рассчитайте сопротивление вольтметра  $R_V$  и неизвестное сопротивление

для каждого измерения, среднее значение  $R_x$ , отклонение каждого значения  $R_x$  от среднего и погрешность в определении  $R_x$ , как среднее значение модуля  $\Delta R_x$ .

Перейдите ко второй схеме измерений. Для этого переключите левый по схеме вывод вольтметра на другой вывод амперметра и замените красный резистор на зеленый.

Повторите измерения для этого резистора, после чего выключите выпрямитель!

Определите сопротивление миллиамперметра. Для этого предварительно из таблиц на шкале приборов М2020 и М2015 нужно выбрать ту, в верхней строке которой указаны значения силы тока, найти в этой строке значение используемого предела измерений, а затем под ним на нижней строке таблицы определить значение падения напряжения на приборе.

**Проверьте** правильность полученных результатов, **измерив сопротивление резисторов при помощи мультиметра**.

Задание 2. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника.

Перейдите к следующей схеме измерений. Для этого нужно заменить измеряемый резистор одним из  $R_{доп}$ , поменять местами провода на клеммах вольтметра и переключить левый по схеме вывод вольтметра на другой полюс источника.

После проверки цепи лаборантом или преподавателем включите выпрямитель и запишите показания приборов в единицах шкалы.

Измените произвольным образом положение движка реостата и повторите измерения и запишите показания во второй строке таблицы.

Выключите выпрямитель.

Отключите цепочку из выпрямителя и  $R_{доп}$ , не разъединяя их, и замените на другой выпрямитель с другим  $R_{доп}$ .

Включите выпрямитель и повторите измерения при двух положениях движка реостата с записью показаний прибор в следующих строках таблицы.

Выключите выпрямитель.

Вычислите значения  $\mathcal{E}$  и  $R_{доп}$  для каждого выпрямителя и запишите их в таблицу.

Задание 3. Измерения и расчет неоднородной цепи.

Соберите цепь для соответствующих измерений. Для этого вначале отключите вольтметр и реостат, а затем между  $R_{доп}$  и микроамперметром вставьте цепочку из резистора  $R_{кр}$ , второго источника со «своим»  $R_{доп}$ , резистора  $R_{зел}$  и ключ. Обратите внимание на то, что на этой схеме дополнительные резисторы обозначены как  $r_1$  и  $r_2$ .

После проверки собранной цепи включите оба выпрямителя и измерьте силу тока в цепи с записью показаний миллиамперметра в таблицу.

Выключите выпрямители. Отключите амперметр и подключите вольтметр к точкам 1 и 4, соблюдая полярность.

Включите только (!) левый по схеме выпрямитель и запишите показания вольтметра при разомкнутой цепи.

Выключите выпрямитель. Переключите вольтметр к точкам 4 и 7, соблюдая полярность.

Включите только (!) правый по схеме выпрямитель и запишите показания вольтметра при разомкнутой цепи.

Выключите выпрямитель. Переключите вольтметр к точкам 1 и 2 (полюсам левого по схеме выпрямителя).

Включите оба выпрямителя и ключ. Запишите в последней таблице показания вольтметра.

Переключите правый по схеме вывод вольтметра на точку 3 и повторите измерения с записью результатов во вторую строчку таблицы.

Подключая вольтметр поочередно к точкам 2, ...7, проведите серию измерений для замкнутой цепи. В некоторых точках может возникнуть необходимость в изменении полярности подключения вольтметра. Тогда значения напряжения следует записывать со знаком « - ».

Разомкните ключ и выключите оба выпрямителя.

Перенесите показания вольтметра для точек 1-4 и 4-7 в предыдущую таблицу в качестве  $U_{1-4}$  (з) и  $U_{4-7}$  (з).

Рассчитайте теоретические значения измеренных тока и напряжений и впишите их в таблицу. Убедитесь в том, что закон Ома выполняется и для цепей, содержащих несколько источников ЭДС.

Задание 4. Построение потенциальных диаграмм.

Запишите в последнюю таблицу значения суммы сопротивлений между соответствующими точками цепи.

По данным таблицы постройте **потенциальную** диаграмму для изученной цепи. При этом следует иметь в виду, что при сделанных допущениях точки 1 и 2 на оси сопротивлений совпадают. Это же относится и к точкам 4 и 5. Потенциальная диаграмма в этих точках представляет собой вертикальную линию, длина которой соответствует величине ЭДС соответствующего источника. Тангенс угла наклона (следовательно, и угол наклона) отрезков диаграммы между точками 2 и 4, а также между 5 и 7 представляет собой отношение  $\Delta U/\Delta R$ , т.е. силу тока, которая в неразветвленной цепи одинакова в разных точках. Поэтому эти отрезки должны быть параллельны друг другу. Их наклон наглядно показывает, почему изменение напряжения на участках цепи называют «падением напряжения».

Если источники включены последовательно, то ЭДС каждого откладывается вверх. Если встречно, то в разные стороны в зависимости от полярности включения. При этом сила тока в цепи и наклон графика будут меньше, чем при последовательном включении источников.

Постройте на этом же графике теоретическую потенциальную диаграмму для этой же цепи, но при разомкнутом ключе. Сила тока в такой цепи и,

следовательно, угол наклона графика равен нулю. Поэтому потенциалы точек 1 и 7 уже не будут одинаковыми .

*После измерений* разберите собранную электрическую цепь и наведите порядок на рабочем месте.