



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

М.В. Вечеркин
О.В. Кривко

**ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА:
практикум по физике**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2022

УДК 621.3.024(076.5)
ББК 31.211я73-5

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры радиофизики и электроники,
ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»
М.А. Загребин

доктор технических наук,
профессор кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»
А.С. Сарваров

Вечеркин М.В., Кривко О.В.

Цепи постоянного тока: практикум по физике [Электронный ресурс] : учебное пособие / Максим Викторович Вечеркин, Оксана Викторовна Кривко ; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (0,97 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9967-2300-3

В практикуме описаны лабораторные работы по общей физике, составленные в соответствии с государственными образовательными стандартами, действующими для студентов технических вузов. Содержит необходимые теоретические сведения, описание экспериментальных установок, порядок проведения работ, методику обработки результатов и контрольные вопросы. Для каждой работы имеется рабочая тетрадь с формой отчета.

Для студентов всех технических специальностей.

УДК 621.3.024(076.5)
ББК 31.211я73-5

ISBN 978-5-9967-2300-3

© Вечеркин М.В., Кривко О.В., 2022

© ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова», 2022

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 22 Измерение параметров источника постоянного тока.....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 23 Расширение предела измерения амперметра и вольтметра постоянного тока.....	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 24 Проверка правил Кирхгофа для цепей постоянного тока.....	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 25 Исследование энергетических характеристик источника постоянного тока.....	39
РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ для отчета по лабораторной работе №22 «Измерение параметров источника постоянного тока».....	46
РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ для отчета по лабораторной работе №23 «Расширение предела измерения амперметра и вольтметра постоянного тока»	57
РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ для отчета по лабораторной работе №24 «Проверка правил Кирхгофа для цепей постоянного тока».....	65
РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ для отчета по лабораторной работе №25 «Исследование энергетических характеристик источника постоянного тока».....	70
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	77
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	78

ВВЕДЕНИЕ

Для подготовки к выполнению лабораторной работы студент должен внимательно изучить разделы «Общие сведения» и «Методика эксперимента», в которых приводятся минимально необходимые теоретические сведения об изучаемых физических явлениях и закономерностях их проявления. В разделе «Литература» даны ссылки на источники, в которых можно получить более подробные и глубокие сведения по тематике выполняемых работ.

Теоретическая подготовка студента может быть проверена преподавателем при устном опросе перед выполнением работы.

Задания для выполнения определяет преподаватель. Перед выполнением работы необходимо оформить конспект, в котором должны содержаться: название, цель работы, схема эксперимента (рисунок с обозначениями), таблицы для внесения экспериментальных данных, расчетные формулы и другие, необходимые для выполнения работы записи.

Допускается, с разрешения преподавателя, вместо конспекта использовать «Рабочую тетрадь». В этом случае следует самостоятельно распечатать форму отчета соответствующей работы и внести в неё все необходимые расчетные формулы. Каждый из листов рабочей тетради должен быть подписан.

Работы №22-№25 выполняются за одним лабораторным стендом. Общий вид, описание и характеристики стенда, оборудования и приборов приведены в Приложении.

Выполнять работу следует строго в соответствии с пунктами раздела «Порядок выполнения работы». При сборке схем источники тока следует подключать в последнюю очередь. Правильность сборки схемы должна быть проверена преподавателем или лаборантом.

Если при выполнении измерений показания приборов выходят за пределы их измерений («зашкаливают»), то схему нужно обесточить и принять меры по устранению неполадки. При необходимости следует обратиться к преподавателю или лаборанту.

По окончании измерений экспериментальные данные показывается преподавателю, после чего схема разбирается, а принадлежности и приборы сдаются лаборанту.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 22

Измерение параметров источника постоянного тока

Цель работы: экспериментальное определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника постоянного тока различными методами; экспериментальная проверка закона Ома для замкнутой цепи.

Приборы и оборудование: лабораторный стенд для изучения цепей постоянного тока; регулируемый источник постоянного напряжения (ИП); цифровой мультиметр; стрелочный микроамперметр с двухсторонней шкалой; магазин сопротивлений Р33; провода соединительные с U-образными и штыревыми контактами.

Литература: [1, §64-65, §67-69, §70]; [2, §5.3-5.5]; [3, §54-55].

Общие сведения

Источники тока преобразуют различные виды энергии в электрическую энергию. *Химические источники тока* вырабатывают электрический ток за счёт энергии окислительно-восстановительных реакций химических реагентов (аккумуляторы, гальванические элементы). *Физическими источниками тока* называют устройства, преобразующие тепловую, механическую и энергию электромагнитных волн в электрическую энергию (электромашинные, термоэлектрические генераторы, солнечные батареи и др.).

Источник тока – это устройство, создающее и поддерживающее разность потенциалов на своих выводах за счёт работы сил неэлектростатического происхождения – сторонних сил. Сторонние силы осуществляют разделение разноименных зарядов в источнике, совершая работу против электростатических сил.

При подключении внешней нагрузки источник создает на ней **напряжение U** и в цепи начинает протекать электрический ток [2, §5.3]. В нагрузке, как правило, происходит преобразование получаемой от источника электрической энергии в другие ее виды: механическую (в электродвигателях), световую (в осветительных лампах), тепловую (в электронагревателях) и т. д.

Напряжение на выводах источника тока всегда в той или иной степени зависит от мощности, отдаваемой в нагрузку. Значение напряжения может быть измерено вольтметром.

Основными параметрами источника тока являются электродвижущая сила E и внутреннее сопротивление r .

Электродвижущая сила источника тока (ЭДС) есть работа сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда по замкнутой цепи:

$$E = \frac{A_{\text{ст}}}{q_0}.$$

ЭДС измеряется в вольтах и численно равна напряжению на выводах источника при разомкнутой внешней цепи.

Внутреннее сопротивление источника тока – это параметр, обусловленный совокупностью физических эффектов, ограничивающих мощность, отдаваемую источником в нагрузку.

К таким эффектам относится, например: малая площадь контактирующих друг с другом химических реагентов в аккумуляторах; конечная скорость вращения лопастей турбогенераторов; ограниченное значение падающего потока световой энергии в солнечных батареях и др. Определенный вклад в ограничение отдаваемой мощности вносит и активное сопротивление отдельных конструктивных элементов источника тока.

Внутреннее сопротивление условно можно представить в виде резистора с сопротивлением r включенного последовательно с источником (рис. 1.1).

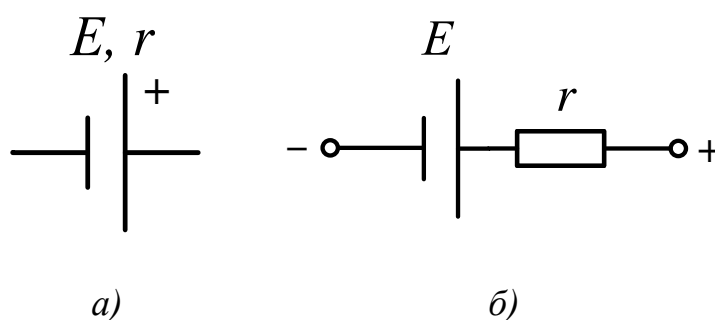


Рис. 1.1. Графическое обозначение источника тока (а) и его эквивалентная схема (б)

Следует понимать, что внутреннее сопротивление не сосредоточено в каком-то одном элементе и является неотъемлемым конструктивным свойством источника тока как целого. Внутреннее сопротивление не может быть измерено непосредственно с помощью омметра и вычисляется по результатам косвенных измерений. В большинстве случаев внутреннее сопротивление можно считать постоянной величиной.

Энергетическими характеристиками источника тока являются *мощность P* и *коэффициент полезного действия η* (КПД), которые определяют характер работы источника на внешнюю цепь и зависят от свойств внешней цепи. Мощность и КПД источника всегда можно найти по известным E , r и сопротивлению нагрузки R (подробнее см. л. р. №25).

Задание 1. Измерение ЭДС источника тока вольтметром Физические основы и методика эксперимента

ЭДС равна разности потенциалов на выводах источника тока при разомкнутой внешней цепи. Идеальный вольтметр, имеющий бесконечное собственное сопротивление, покажет значение ЭДС источника в пределах своего класса точности.

Любой реальный вольтметр потребляет от источника некоторую мощность, необходимую для работы измерительной цепи и имеет конечное значение собственного сопротивления.

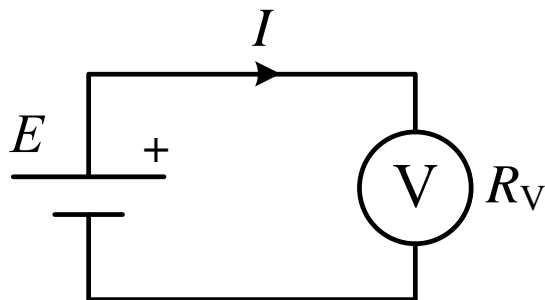


Рис. 1.2. Измерение ЭДС вольтметром

Если к источнику тока подключить вольтметр (рис. 1.2), то в цепи потечет ток:

$$I = \frac{E}{R_V + r}.$$

Этот ток создает на вольтметре падение напряжения:

$$U_V = R_V I.$$

Подставив первое уравнение во второе, и проведя элементарные преобразования, получим

$$U_V = \frac{E}{1 + \frac{r}{R_V}}.$$

Очевидно, что показания вольтметра будут тем ближе к значению ЭДС, чем больше отношение r/R_V .

Влияние сопротивления вольтметра на результат измерения можно считать несущественным при $R_V/r > 1000$. Для измерений в данной лабораторной работе используется цифровой мультиметр, имеющий в режиме вольтметра сопротивление $R_V = 1 \text{ МОм}$.

Порядок выполнения Задания 1

1.1. Установите переключатель мультиметра на предел «20 V». Измерьте напряжение на выводах источников E_1 и E_2 .

1.2. Соедините источники последовательно, как показано на рис. 1.3, и измерьте напряжение на выводах батареи (между точками *a* и *b*) на пределе «20 V» или «200 V».

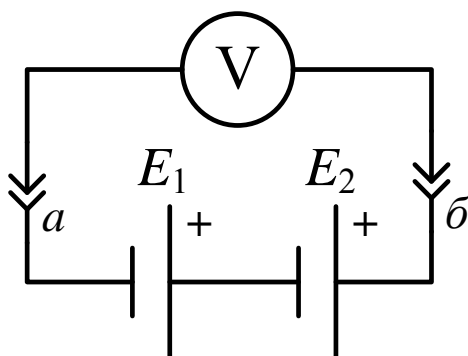


Рис. 1.3

1.3. Рассчитайте абсолютные $\sigma(U)$ и относительные $\varepsilon(U)$ погрешности прямого измерения напряжения для каждого случая:

$$\sigma(U) = \frac{\gamma}{100} \cdot U_{\max}, \quad \varepsilon(U) = \frac{\sigma(U)}{U} \cdot 100\%,$$

где γ – класс точности прибора для данного предела измерения, U_{\max} – предельное (максимальное) значение шкалы прибора, U – значение измеренной величины (показание прибора).

1.4. Результаты измерений и расчетов запишите в табл. 1.1.

Таблица.1.1

	U_V, B	Предел измерения U_{\max}, B	Класс точности γ	$\sigma(U), B$	$\varepsilon(U), \%$
E_1					
E_2					
$E_{1,2}$					

1.5. Сравните значения относительных погрешностей и сделайте выводы.

Задание 2. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления по нагрузочной характеристике источника тока. Физические основы и методика эксперимента

Напряжение на выводах источника тока зависит от сопротивления нагрузки, подключенной к нему. Степень влияния нагрузки определяется внутренним сопротивлением источника.

Нагрузочная характеристика представляет собой зависимость напряжения на источнике от тока нагрузки.

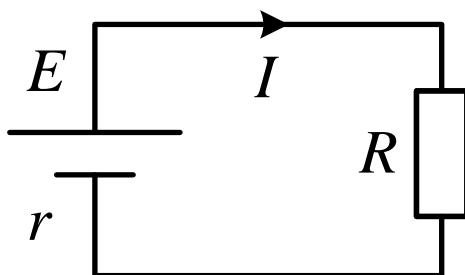


Рис. 1.4

Для схемы на рис.1.4 действительно следующее выражение, составленное по II правилу Кирхгофа:

$$E = IR + Ir .$$

Учитывая, что $U = IR$, выражение можно переписать в виде:

$$U = E - rI . \tag{1.1}$$

Формула (1.1) представляет собой уравнение прямой, общий вид которой представлен на рис.1.5.

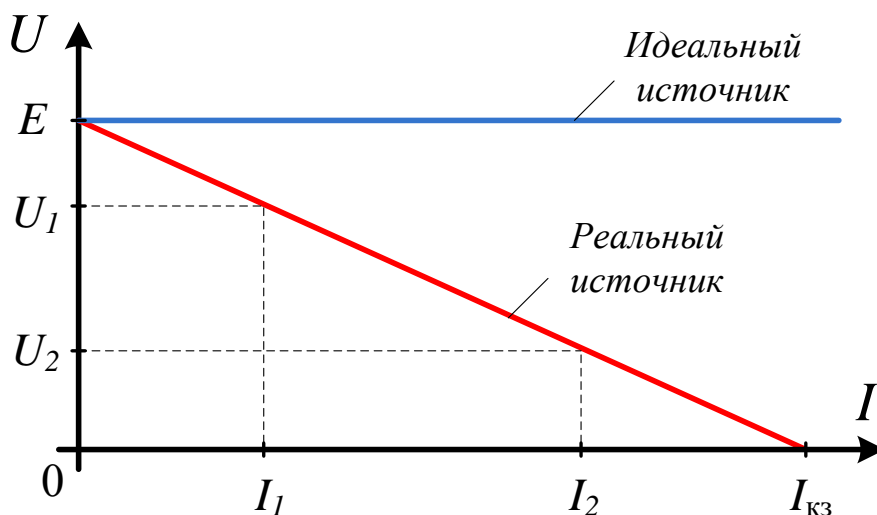


Рис. 1.5. Нагрузочная характеристика источника тока

Свободный член уравнения (1.1) равен ЭДС, а угловой коэффициент прямой определяет внутреннее сопротивление источника. Таким образом, получив экспериментально зависимость $U = f(I)$ и найдя коэффициенты уравнения, можно определить параметры исследуемого источника тока.

Порядок выполнения Задания 2

2.1. Соберите схему, приведенную на рис. 1.6. Ключ K_2 установите в разомкнутое положение (рычажок вниз). Переключатель мультиметра установите на предел «20 V». На магазине сопротивлений установите сопротивление $R_0 = 800 \dots 900 \text{ Ом}$.

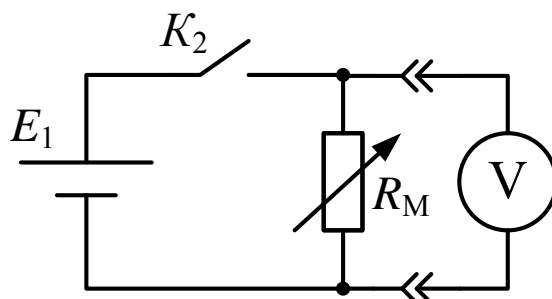


Рис. 1.6

2.2. Замкните ключ K_2 (рычажок вверх). Запишите в табл. 1.2 показания вольтметра и значение сопротивления на магазине.

2.3. Проведите измерения напряжений на магазине для сопротивлений в диапазоне от R_0 до $0,01R_0$. При необходимости переключите мультиметр на предел «2 V». Переключение предела проводите только при разомкнутом ключе K_2 (рычажок вниз).

Результаты измерений и пределы, на которых они проводились, занесите в табл. 1.2.

Таблица 1.2

	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_M, \text{ Ом}$								
$U, \text{ В}$								
$I, \text{ мА}$								
Предел измерения $U_{\text{max}}, \text{ В}$								
Класс точности γ								
$\sigma(I), \text{ мА}$								

2.4. По известным сопротивлениям и напряжениям на магазине рассчитайте токи источника всех экспериментальных точек.

2.5. Рассчитайте абсолютные погрешности косвенного измерения тока для каждой экспериментальной точки, приняв $\sigma(R) = 0,1 \text{ Ом}$:

$$\sigma(I) = \sqrt{\frac{\sigma^2(U)}{R_M^2} + \frac{U^2}{R_M^4} \cdot \sigma^2(R)},$$

где $\sigma(U)$ – абсолютная погрешность измерения напряжения (см. п. 1.3).

2.6. Подсоедините источник E_2 и повторите пункты 2.2-2.5. Результаты измерений и расчетов занесите в отдельную таблицу, аналогичную табл. 1.2.

2.7. Постройте на одном графике экспериментальные зависимости $U = f(I)$ для E_1 и E_2 . Получите уравнения прямых и определите ЭДС и внутреннее сопротивление источников.

2.8. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Задание 3. Экспериментальная проверка закона Ома для замкнутой цепи. Измерение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока методом известных сопротивлений. Физические основы и методика эксперимента

Для источника тока, подключенного к нагрузке с сопротивлением R (рис. 1.4), справедлив закон Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{E}{R + r}. \quad (1.2)$$

Указанное соотношение можно проверить экспериментально, исследовав зависимость тока I от сопротивления нагрузки R , которая является нелинейной.

Однако, построив график экспериментальной зависимости $I=f(R)$, нельзя однозначно утверждать, что эта кривая представляет собой гиперболу, соответствующую формуле (1.2). Аналогичный характер изменения могут иметь степенные зависимости различных порядков, экспоненциальные и тригонометрические функции. Единственным графиком, по внешнему виду которого можно однозначно судить о характере исследуемой зависимости, является прямая линия.

Поэтому, для подтверждения проверяемой закономерности необходимо выявить такие переменные, зависимость между которыми была бы линейной и построить линеаризованный график. Для выражения (1.2) такими переменными являются R и $1/I$. Линеаризованная связь этих переменных имеет вид:

$$R = E \cdot \frac{1}{I} - r.$$

График этой связи представлен на рис. 1.7.

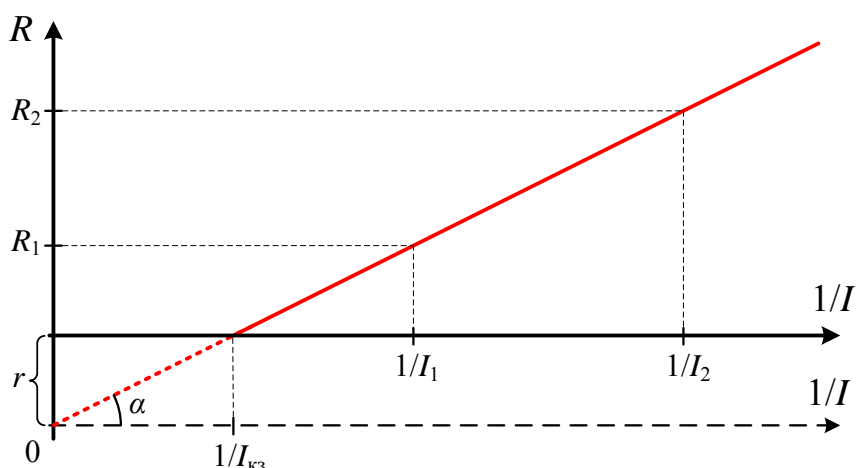


Рис. 1.7

На графике ЭДС источника является угловым коэффициентом прямой, а внутреннее сопротивление – координатой пересечения прямой с осью R . По оси R отложено *полное* сопротивление всей цепи, включающее суммарное внешнее сопротивление и внутреннее сопротивление источника тока.

Пунктирная ось $1/I$ и пунктирное продолжение прямой $R=f(1/I)$, соответствуют идеальному источнику ЭДС с нулевым внутренним сопротивлением. Точка пересечения прямой со сплошной осью $1/I$ соответствует режиму короткого замыкания.

Закон Ома для замкнутой цепи (1.2) следует считать подтвержденным, если через все экспериментальные точки в пределах погрешностей их измерений можно провести прямую линию.

Определить значения E и r можно аналитически, решив уравнение (1.2) для двух значений сопротивления и тока:

$$E = \frac{R_2 - R_1}{1/I_2 - 1/I_1}, \quad (1.3)$$

$$r = \frac{R_2 I_2 - R_1 I_1}{I_1 - I_2}. \quad (1.4)$$

Из формул очевидно, что точность расчёта однозначно определяется точностью установленного сопротивления внешней цепи и точностью измерения тока источника.

Порядок выполнения Задания 3

3.1. Соберите схему, приведенную рис. 1.8. В качестве миллиамперметра используйте мультиметр в режиме измерения постоянного тока. Ключ K_1 установите в разомкнутое положение (рычажок вниз).

3.2. Установите на магазине R_M сопротивление, заданное преподавателем ($R_0 = 2,5 \dots 3 \text{ кОм}$). Переключатель мультиметра установите в положение «20 мА».

3.3. Замкните ключ K_1 (рычажок вверх) и измерьте значение тока I , соответствующее установленному сопротивлению внешней цепи R_0 .

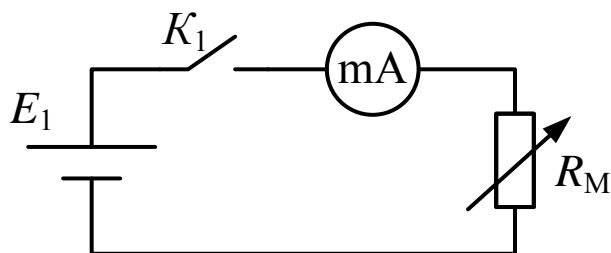


Рис. 1.8

3.4. Проведите аналогичные измерения для 7-8 значений сопротивления магазина в пределах от R_0 до $0,01R_0$. При значениях тока в цепи выше 20 мА необходимо переключить мультиметр на предел измерения «200 мА». Переключение предела проводите только при разомкнутом ключе K_1 ! Результаты измерений занесите в табл. 1.3.

Таблица 1.3

	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_M, \text{ Ом}$								
$I, \text{ мА}$								
$\sigma(I_{\text{мА}})$								
$1/I, (\text{мА})^{-1}$								
$\sigma(1/I_{\text{мА}})$								

3.5. Замените источник E_1 на E_2 и повторите пункты 3.2-3.4 задания. Результаты измерений и расчетов занесите в отдельную таблицу, аналогичную табл. 3.

3.6. Рассчитайте и занесите в табл. 1.3 абсолютную погрешности $\sigma(I_{\text{мА}})$ прямого измерения тока I (см. п. 1.3) и абсолютную погрешность $\sigma(1/I_{\text{мА}})$ косвенного измерения величины $1/I$ для каждой экспериментальной точки:

$$\sigma(1/I_{mA}) = \sqrt{\left(\frac{\partial 1/I}{\partial I}\right)^2 \cdot \sigma^2(I_{mA})} = \frac{\sigma(I_{mA})}{I^2},$$

где I – значение тока экспериментальной точки.

3.7. Отметьте на графике в осях $R=f(1/I)$ экспериментальные точки. Укажите на графике погрешности $\sigma(1/I_{mA})$ для каждой точки (по заданию преподавателя). Постройте линеаризованные зависимости для обоих источников ЭДС. Получите уравнения прямых и найдите значения E и r источников.

3.8. Для двух экспериментальных точек из табл. 1.3 рассчитайте ЭДС и внутренние сопротивления обоих источников по формулам (1.3) и (1.4). По заданию преподавателя рассчитайте абсолютную погрешность косвенного измерения этих величин.

3.9. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Задание 4. Измерение ЭДС источника методом компенсации Физические основы и методика эксперимента

Метод компенсации является одним из основных методов точных лабораторных измерений ЭДС. Сущность метода заключается в том, что измеряемая ЭДС E_x уравнивается (компенсируется) падением напряжения, которое создается на известном сопротивлении током I_0 от вспомогательного источника E_0 (рис. 1.9).

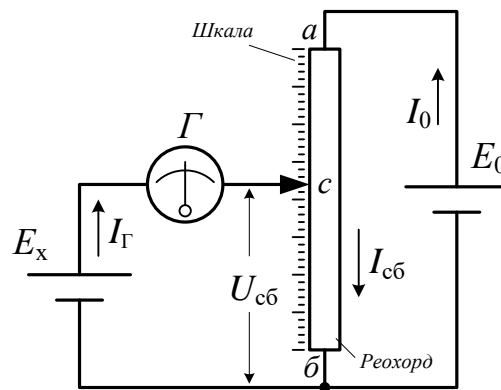


Рис. 1.9. Принцип компенсационного метода измерения ЭДС

Для реализации метода необходимо, чтобы ЭДС вспомогательного источника была больше измеряемой ЭДС:

$$E_0 > E_x.$$

Необходимое уравнивающее напряжение создается на специальном сопротивлении. В качестве такого сопротивления может быть использован делитель напряжения с регулируемыми сопротивлениями плеч или реохорд.

Понять принцип компенсационного метода проще на примере реохорда. Реохорд – это реостат из калиброванной проволоки, натянутой или намотанной на барабан, по которой может перемещаться подвижный контакт (ползунок).

Если передвигать ползунок вдоль реохорда сверху вниз, то напряжение $U_{сб}$ будет изменяться от E_0 (в точке a) до 0 (в точке b). В некотором положении ползунка (точка c) напряжение $U_{сб}$ станет равным E_x .

Условие $U_{сб} = E_x$ называют *условием компенсации* или *условием равновесия*. В этом случае ток через гальванометр G не протекает ($I_G = 0$) и его стрелка находится на нуле.

Для источника с другим значением ЭДС на реохорде также может быть найдена точка, в которой стрелка гальванометра установится на ноль.

Если вдоль реохорда расположить шкалу, проградуированную в единицах напряжения, то по положению движка можно судить о величине измеряемой ЭДС.

Важнейшим свойством такого метода измерения является то, что гальванометр используется не для измерения тока источника E_x , а для определения его нулевого значения. По сути, компенсационная схема измерения является *идеальным вольтметром*, так как она не потребляет энергию от источника, ЭДС которого измеряется.

Для градуировки шкалы и проведения измерений необходим специальный источник, который называют *эталонным*. Значение ЭДС такого источника должна быть известна с высокой точностью и не подвергаться влиянию внешних факторов.

Рассмотрим работу схемы на рис. 1.9 в случае, когда в измерительную цепь включен эталонный источник $E_{эт}$. Примем, что вспомогательный источник E_0 имеет пренебрежимо малое внутреннее сопротивление. В общем случае, схему можно описать системой уравнений, составленных по правилам Кирхгофа:

$$\begin{cases} I_0 + I_G = I_{сб}; \\ E_{эт} = I_G (R_G + R_{эт}) + I_{сб} R_{сб}; \\ E_0 = I_0 R_{ac} + I_{сб} R_{сб}; \end{cases}$$

где R_G – сопротивление гальванометра; $R_{эт}$ – внутреннее сопротивление эталонного источника; I_0 – ток вспомогательного источника; R_{ac} , $R_{сб}$ – сопротивления участков ac и $сб$ реохорда.

В режиме равновесия, когда соблюдается условие компенсации, ток гальванометра $I_G = 0$ А. При этом $I_0 = I_{сб}$, а $R_{ac} + R_{сб}$ равно полному сопротивлению реохорда R .

Тогда для $E_{эт}$ может быть получено выражение:

$$E_{\text{ЭТ}} = \frac{E_0}{R} R_{\text{сб}} = I_0 R_{\text{сб}}. \quad (1.5)$$

Для ЭДС, имеющей значение E_x , уравнение примет вид:

$$E_x = \frac{E_0}{R} R'_{\text{сб}} = I_0 R'_{\text{сб}}. \quad (1.6)$$

Решая (1.5) и (1.6) совместно, получим:

$$E_x = E_{\text{ЭТ}} \frac{R'_{\text{сб}}}{R_{\text{сб}}}. \quad (1.7)$$

Таким образом, измерение E_x сводится к измерению сопротивлений участков реохорда, на которых происходит компенсация соответствующих значений ЭДС. Для реохорда из однородной проволоки:

$$R_{\text{сб}} = \rho \frac{l_{\text{сб}}}{S}; \quad R'_{\text{сб}} = \rho \frac{l'_{\text{сб}}}{S};$$

где ρ – удельное сопротивление материала проволоки; S – сечение проволоки; $l_{\text{сб}}$ – длина участка с сопротивлением $R_{\text{сб}}$; $l'_{\text{сб}}$ – длина участка с сопротивлением $R'_{\text{сб}}$.

В итоге, выражение (1.7) примет вид

$$E_x = E_{\text{ЭТ}} \frac{l'_{\text{сб}}}{l_{\text{сб}}}. \quad (1.8)$$

На результат измерений не влияет значение E_0 , сопротивление реохорда R и внутреннее сопротивление источника E_x . Однако, отношение E_0/R , то есть ток через реохорд I_0 , должен быть строго одинаков при измерении $E_{\text{ЭТ}}$ и E_x . Это предъявляет высокие требования к стабильности напряжения вспомогательного источника и качеству реохорда.

Схема с реохордом удобна для понимания и расчета. На практике она используется в автоматических потенциометрах, где скользящий контакт перемещается с помощью специального электропривода. Сам реохорд изготавливают из износостойкой проволоки с высоким удельным сопротивлением.

В данной лабораторной работе используется два варианта компенсационной схемы с ручным уравновешиванием (рис. 1.10).

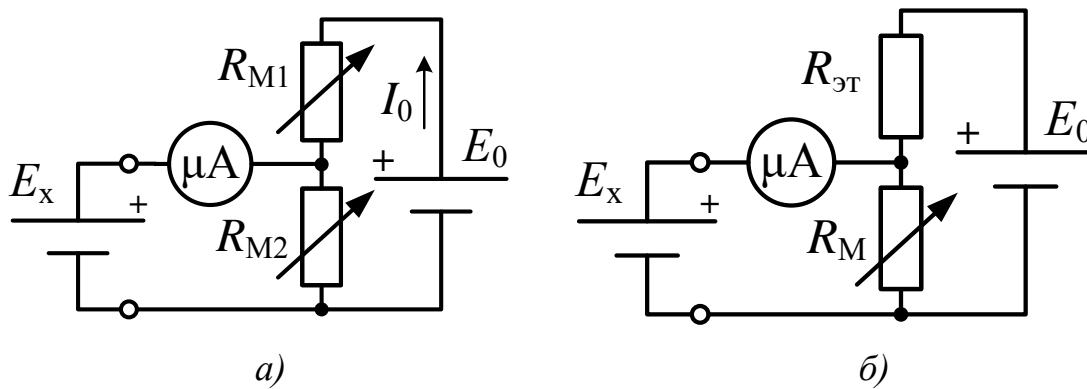


Рис. 1.10. Варианты компенсационных измерительных схем

Вариант 1.

Для создания компенсирующего напряжения используется делитель, в плечи которого включены прецизионные декадные магазины сопротивлений РЗЗ (рис. 1.10, а). Один из магазинов размещен на стенде, другой – переносной. При уравнивании схемы сопротивления магазинов нужно изменять одновременно, строго соблюдая условие:

$$R_{M1} + R_{M2} = const .$$

В этом случае $I_0 = const$, и значение измеряемой ЭДС определяется выражением, аналогичным выражению (1.7):

$$E_x = E_{эт} \frac{R'_{M2}}{R_{M2}} , \quad (1.9)$$

где R_{M2} – сопротивление магазина при подключении $E_{эт}$; R'_{M2} – сопротивление магазина при подключении E_x .

Вариант 2.

Для создания компенсирующего напряжения используется делитель, в верхнее плечо которого включают постоянное сопротивление $R_{эт}$ (рис. 1.10, б), а в нижнее – декадный магазин сопротивлений РЗЗ. При таком способе измерения ток источника не является стабильным.

Расчетное выражение для измеряемой ЭДС имеет вид:

$$E_x = E_{эт} \frac{R'_M}{R_M} \cdot \frac{R_{эт} + R_M}{R_{эт} + R'_M} ; \quad (1.10)$$

где R_M – сопротивление магазина при подключении $E_{эт}$; R'_M – сопротивление магазина при подключении E_x .

Порядок выполнения Задания 4

Вариант измерительной схемы задается преподавателем.

Вариант 1.

4.1.1. Соберите схему, приведенную на рис. 1.11. В качестве E_0 используйте регулируемый источник питания (ИП). Балластное сопротивление R_B включите в схему с помощью проводов со штыревыми контактами. Ключи K_1 и K_2 установите в разомкнутое положение (рычажки вниз). Занесите в тетрадь значение ЭДС эталонного источника $E_{\text{эт}}$.

4.1.2. На магазинах R_{M1} и R_{M2} установите по заданию преподавателя одинаковые значения сопротивлений порядка $2,5 \dots 3,0 \text{ кОм}$.

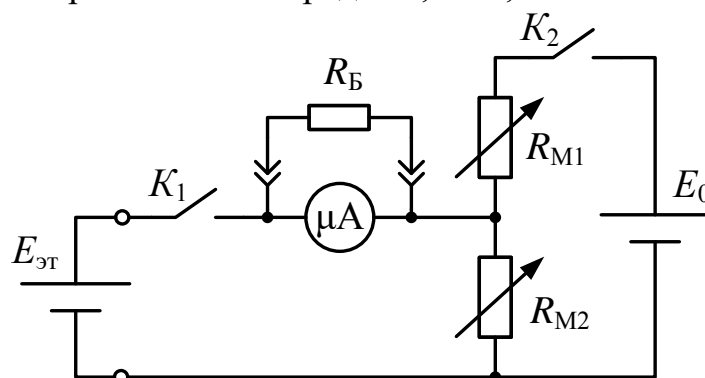


Рис. 1.11

4.1.3. Включите ИП и вращением ручки «Voltage» установите на выходе напряжение величиной $15 \dots 17 \text{ В}$. Ручку «Current» установите в среднее положение.

4.1.4. Замкните ключ K_2 (рычажок вверх). Установите на мультиметре предел «20 V» и измерьте напряжение на источнике. Значение напряжения занесите в тетрадь.

4.1.5. Замкните ключ K_1 (рычажок вверх). Изменением сопротивлений магазинов R_{M1} и R_{M2} проведите грубое уравнивание гальванометра.

Уравнивание необходимо начинать со старших декад « $\times 1000$ », « $\times 100$ ». Если стрелка гальванометра отклоняется влево, R_{M1} нужно увеличивать (одновременно уменьшая R_{M2}), если вправо – R_{M1} необходимо уменьшать (одновременно увеличивая R_{M2}). Сумма $R_{M1} + R_{M2}$ должна быть постоянной.

4.1.6. Отключите балластное сопротивление R_B и проведите точное уравнивание гальванометра. При достижении равновесия убедитесь, что напряжение на источнике E_0 не изменилось. Значение сопротивления R_{M2} , соответствующее точному равновесию схемы, занесите в табл. 1.4.1.

4.1.7. Включите в схему источник E_1 и балластное сопротивление R_B (рис. 11). Повторите для E_1 пункты 4.1.4-4.1.6.

4.1.8. Включите в схему источник E_2 и балластное сопротивление R_B (рис. 11). Повторите для E_2 пункты 4.1.4-4.1.6.

4.1.9. Занесите в табл. 2.4.1 значения R_{M2} для каждого источника и рассчитайте значения E_1 и E_2 по формуле (1.9).

	$R'_{M2}, \text{ Ом}$	$R_{M2}, \text{ Ом}$	Значение ЭДС, В
Источник $E_{\text{эт}}$		–	
Источник E_1	–		
Источник E_2	–		

4.1.10. Сравните полученные значения с результатами прямых измерений проведенных в Задании 1.

4.1.11. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Вариант 2.

4.2.1. Соберите схему, приведенную на рис. 1.12. В качестве E_0 используйте регулируемый источник питания (ИП). Балластное сопротивление R_B включите в схему с помощью проводов со штыревыми контактами. Ключи K_1 и K_2 установите в разомкнутое положение (рычажком вниз). Занесите в тетрадь значение ЭДС эталонного источника $E_{\text{эт}}$ и эталонного сопротивления $R_{\text{эт}}$.

4.2.2. На магазине установите значение сопротивления равно $R_{\text{эт}}$.

4.2.3. Включите ИП и вращением ручки «Voltage» установите на выходе напряжение величиной 15...17 В. Ручку «Current» установите в среднее положение.

4.2.4. Замкните ключ K_2 (рычажок вверх). Установите на мультиметре предел «20 V» и измерьте напряжение на делителе. Значение напряжения запишите в тетрадь.

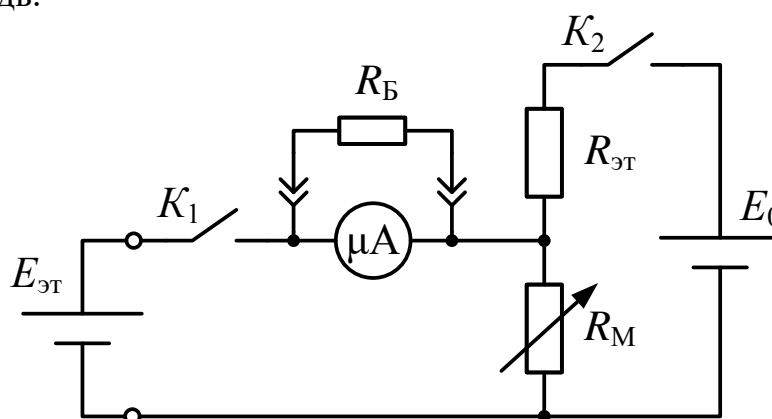


Рис. 1.12

4.2.5. Замкните ключ K_1 (рычажок вверх). Изменением сопротивления магазина R_M проведите грубое уравнивание гальванометра.

Уравнивание необходимо начинать со старших деkad « $\times 1000$ », « $\times 100$ ». Если стрелка гальванометра отклоняется влево, R_M нужно уменьшать, если вправо – увеличивать.

4.2.6. Отсоедините балластное сопротивление R_B и проведите точное уравнивание гальванометра. При достижении равновесия убедитесь, что

напряжение на делителе не изменилось. Значение сопротивления R_M , соответствующее точному равновесию схемы, занесите в табл. 1.4.2.

4.2.7. Включите в схему источник E_1 и балластное сопротивление R_B (рис. 12). Повторите для E_1 пункты 4.2.4-4.2.6.

4.2.8. Включите в схему источник E_2 и повторите для него пункты 4.2.4-4.2.6.

Таблица 1.4.2

	$R'_M, \text{ Ом}$	$R_M, \text{ Ом}$	Значение ЭДС, В
Источник $E_{\text{эт}}$		—	
Источник E_1	—		
Источник E_2	—		

4.2.9. Занесите в таблицу значения R_M для каждого источника и рассчитайте значения E_1 и E_2 по формуле (1.10).

4.2.10. Сравните полученные значения с результатами прямых измерений проведенных в Задании 1.

4.2.11. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называется электродвижущей силой источника тока?
2. Какие силы называются сторонними? Какова их природа?
3. Почему ЭДС источника не может быть обусловлена силами электростатического происхождения?
4. Что такое внутреннее сопротивление источника тока? Чем обусловлено наличие внутреннего сопротивления?
5. В чем суть прямого измерения напряжения с помощью вольтметра? Каковы преимущества и недостатки этого метода?
6. Почему при прямом измерении напряжения вольтметром рекомендуется выбирать предел так, чтобы значение измеряемого напряжения было как можно ближе к пределу измерения вольтметра?
7. Во сколько раз входное сопротивление вольтметра должно превышать сопротивление участка цепи, чтобы погрешность измерения, вызванная влиянием вольтметра, не превышала 5%?
8. Как определяется ЭДС и внутреннее сопротивление по нагрузочной характеристике источника тока?
9. Как в данной работе экспериментально проверяется закон Ома для замкнутой цепи?
10. В чем суть компенсационного метода измерения ЭДС? В чем преимущество компенсационного метода перед прямым измерением вольтметром?
11. Докажите математически справедливость формулы (2.10).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 23

Расширение предела измерения амперметра и вольтметра постоянного тока

Цель работы: экспериментальная проверка методики расчета шунта и добавочного сопротивления к электроизмерительному прибору; экспериментальное исследование характеристик амперметра и вольтметра с расширенными пределами измерения.

Приборы и оборудование: лабораторный стенд для изучения цепей постоянного тока, регулируемый источник постоянного напряжения (ИП), цифровой мультиметр, стрелочный миллиамперметр, стрелочный амперметр, магазин сопротивлений РЗЗ, провода соединительные с U-образными и штыревыми контактами, набор проволочных шунтов.

Литература: [1, §57-59, §70]; [3, §47-51].

Общие сведения

Электроизмерительные приборы – устройства, используемые для измерения различных электрических величин. По виду измеряемой физической величины электроизмерительные приборы делятся на: амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, частотомеры и др. У приборов электромеханического типа стрелочный указатель отклоняется на угол, зависящий от измеряемой физической величины. Основой стрелочных приборов является измерительный механизм (ИМ).

Измерительный механизм преобразует подведенную к нему электрическую энергию в механическую работу по угловому перемещению стрелки относительно неподвижной шкалы.

При измерениях на постоянном токе наибольшее распространение получили приборы с магнитоэлектрической системой ИМ. Такие приборы имеют линейную шкалу, характеризуются высокой точностью и чувствительностью, малым собственным потреблением энергии. На показания магнитоэлектрических приборов мало влияют колебания температуры окружающей среды и изменения напряженности внешнего электромагнитного поля. Недостатки этих приборов – непригодность для измерения переменного тока, чувствительность к перегрузкам, высокая стоимость.

У магнитоэлектрического ИМ есть два основных параметра, определяющих возможность его использования.

Ток полного отклонения $I_{\text{по}}$ – наибольший ток, при котором стрелка отклоняется до конечной отметки шкалы. Значение $I_{\text{по}}$ для магнитоэлектрических ИМ обычно лежит в диапазоне от 1 мкА до 50 мА.

Сопротивление измерительного механизма $R_{\text{им}}$ – сумма сопротивлений рамки, пружин и подводящих проводов ИМ. Значение $R_{\text{им}}$ может колебаться в пределах от десятых долей до нескольких тысяч Ом.

В некоторых случаях удобно пользоваться таким параметром как **напряжение полного отклонения**: $U_{\text{по}} = I_{\text{по}} R_{\text{им}}$.

Если через ИМ протекает ток, превышающий $I_{\text{по}}$, то это может привести к выходу прибора из строя. Поэтому, для измерения токов, превышающих $I_{\text{по}}$, и напряжений, больших $U_{\text{по}}$, используют специальные вспомогательные устройства – шунты и добавочные сопротивления.

Шунт – электрический проводник, присоединяемый параллельно измерительному механизму для отвлечения части электрического тока и расширения пределов его измерения (рис. 2.1 а). Как правило, бóльшая часть измеряемого тока I идет через шунт, меньшая – через измерительный механизм. Шунты применяют только с магнитоэлектрическими ИМ на постоянном токе.

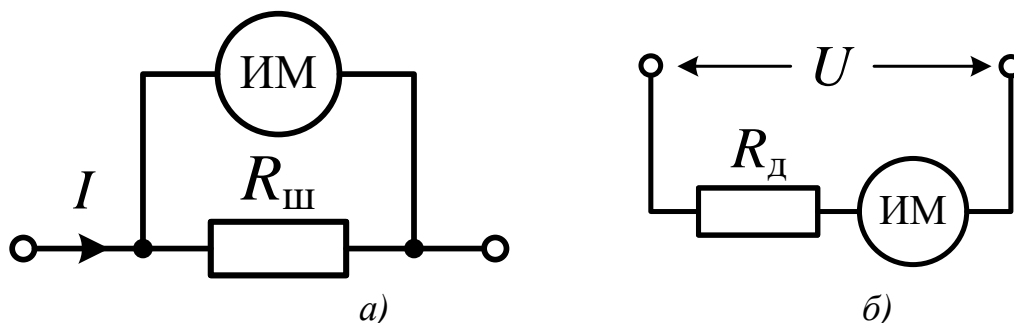


Рис. 2.1. Структура магнитоэлектрического амперметра (а) и вольтметра (б)

Добавочное сопротивление – электрический проводник, включаемый последовательно с измерительным механизмом для ограничения тока через него (рис. 2.1 б). Добавочное сопротивление предназначено для создания или расширения предела измерения вольтметра. Как правило, бóльшая часть измеряемого напряжения U падает на добавочном сопротивлении, меньшая – на измерительном механизме.

Расширение пределов измерения может быть реализовано и для уже готовых амперметров и вольтметров. В этом случае при расчетах шунта или дополнительного сопротивления необходимо вместо $R_{\text{им}}$ использовать полное внутреннее сопротивление прибора $R_{\text{п}}$, которое учитывает не только сопротивление ИМ, но и имеющиеся в приборе вспомогательные устройства.

Физические основы и методика эксперимента

1. Определение внутреннего сопротивления прибора

Для расширения предела миллиамперметра, либо создания на его основе вольтметра нужно знать внутреннее сопротивление прибора $R_{\text{п}}$. Значение $R_{\text{п}}$ приводится в паспорте к прибору, либо измеряется экспериментально.

В данной работе для определения $R_{\text{п}}$ используется метод эталонного сопротивления. Для определения неизвестного сопротивления $R_{\text{х}}$ последовательно с ним включается эталонный резистор $R_{\text{эт}}$, значение которого известно с высокой точностью (рис. 2.2).

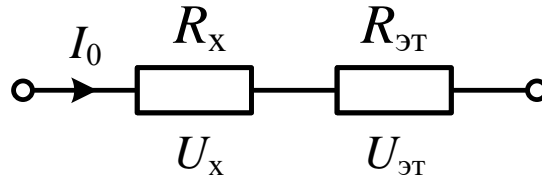


Рис. 2.2. Схема метода эталонного сопротивления

Если пропустить через эту цепь постоянный ток I_0 , то он создаст на сопротивлениях падения напряжения U_x и $U_{эт}$. Ток I_0 одинаков для обоих сопротивлений, поэтому действительно равенство:

$$\frac{U_x}{R_x} = \frac{U_{эт}}{R_{эт}}$$

Преобразовав это выражение, получим:

$$R_x = R_{эт} \frac{U_x}{U_{эт}}$$

Таким образом, неизвестное сопротивление R_x можно определить с помощью известного сопротивления $R_{эт}$, измерив напряжения U_x и $U_{эт}$ при неизменном токе I_0 .

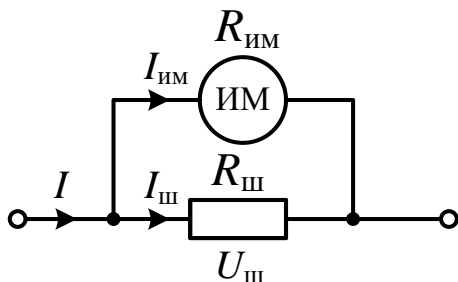
2. Расчет шунта к миллиамперметру

Пусть с помощью миллиамперметра, рассчитанного на ток $I_{по}$, необходимо измерить ток I , максимальное значение которого в k раз превышает $I_{по}$ (рис. 2.3). Для приведенной схемы можно записать систему уравнений, составленных по законам Кирхгофа:

$$\begin{cases} I - I_{по} - I_{ш} = 0, \\ I_{ш} R_{ш} - I_{по} R_{п} = 0. \end{cases}$$

Учитывая, что $I = kI_{по}$, запишем систему в виде

$$\begin{cases} I_{по} (k - 1) = I_{ш}, \\ I_{ш} R_{ш} = I_{по} R_{п}. \end{cases}$$



В итоге искомое сопротивление шунта

Рис. 2.3

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{п}}}{(k-1)}.$$

Параметр k называют *коэффициентом шунтирования*. Он показывает, во сколько раз увеличивается предел измерения зашунтированного амперметра.

3. Расчет добавочного сопротивления к вольтметру

Для создания вольтметра, рассчитанного на максимальное напряжение U в n раз превышающее $U_{\text{по}}$, необходимо подобрать добавочное сопротивление $R_{\text{д}}$ так, чтобы ток через измерительный механизм не превышал $I_{\text{по}}$ (рис. 2.4).

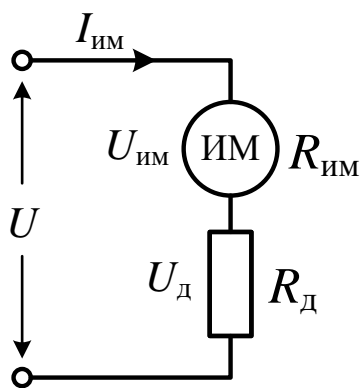


Рис. 2.4 $U_{\text{по}}$

Ток в схеме можно выразить через измеряемое напряжение

$$I_{\text{по}} = \frac{U}{R_{\text{п}} + R_{\text{д}}},$$

или через напряжение полного отклонения прибора

$$I_{\text{по}} = \frac{U_{\text{по}}}{R_{\text{п}}}.$$

Приравнивая правые части и учитывая, что $U = nU_{\text{по}}$, получим выражения для расчета добавочного сопротивления к вольтметру:

$$R_{\text{д}} = R_{\text{п}}(n-1).$$

Параметр n называют *коэффициентом деления*. Он показывает, во сколько раз увеличивается предел измерения вольтметра.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение внутреннего сопротивления прибора

1.1. Получите у преподавателя задание на шунтирование милли- или микроамперметра. Заполните табл. 2.1.

Характеристики шунтируемого прибора

Тип прибора	Количество делений, N	Предел измерения, $I_{\text{по}}$	Цена деления, C	Класс точности, γ

1.2. Соберите схему, приведенную на рис. 2.5. Ключ K_2 установите в разомкнутое положение (рычажок вниз). Установите на магазине сопротивлений $R_M = 9,5 \text{ кОм}$.

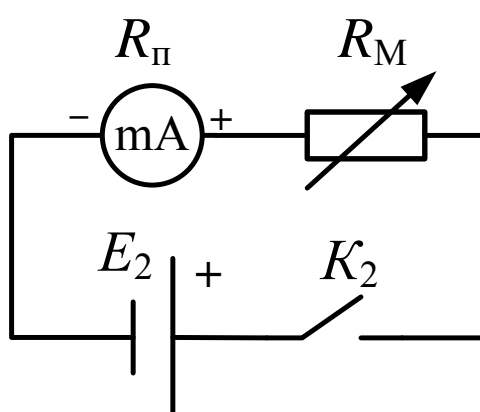


Рис. 2.5. Схема для определения внутреннего сопротивления миллиамперметра

1.3. Замкните ключ K_2 (рычажок вверх). Изменяя сопротивление магазина, добейтесь предельного отклонения стрелки прибора.

1.4. Измерьте мультиметром напряжение на магазине U_M (предел «20 V») и миллиамперметре U_{mA} (предел «200 mV»), занесите значения в тетрадь.

1.5. Рассчитайте сопротивление прибора:

$$R_{\text{II}} = R_M \frac{U_{\text{mA}}}{U_M}.$$

1.6. Рассчитайте абсолютные погрешности $\sigma(U_M)$ и $\sigma(U_{\text{mA}})$ измерения напряжений U_M и U_{mA} соответственно (см. л.р. №22, стр. 9).

1.7. Рассчитайте абсолютную погрешность косвенного измерения сопротивления, приняв $\sigma(R_M) = 0,1 \text{ Ом}$:

$$\sigma(R_{\text{II}}) = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{mA}}}{U_M}\right)^2 \sigma^2(R_M) + \left(\frac{R_M}{U_M}\right)^2 \sigma^2(U_{\text{mA}}) + \left(\frac{-R_M \cdot U_{\text{mA}}}{U_M^2}\right)^2 \sigma^2(U_M)}.$$

Задание 2. Расчет шунта и расширение предела измерения

милли-, микроамперметра

2.1. Запишите максимальный ток $I_{\text{расч}}$, который должен измеряться зашунтированным прибором (задается преподавателем). Вычислите расчетные значения коэффициента шунтирования и цены деления амперметра:

$$k_{\text{расч}} = \frac{I_{\text{расч}}}{I_{\text{по}}}; \quad C_{\text{расч}} = \frac{I_{\text{расч}}}{N}.$$

2.2. Вычислите расчетное сопротивление шунта:

$$R_{\text{расч}} = \frac{R_{\text{п}}}{k_{\text{расч}} - 1}.$$

2.3. Выберите шунт с сопротивлением, максимально близким к расчетному. При необходимости измерьте сопротивление шунта прибором АК ИП-6101 под руководством преподавателя (см. Приложение). При значениях $R_{\text{расч}} > 10$ Ом в качестве шунта используйте магазин сопротивлений Р33. Занесите в тетрадь реальное значение сопротивления шунта $R_{\text{эсп}}$.

2.4. По заданному значению $I_{\text{расч}}$ выберите прибор, который будет использоваться в качестве эталонного: стрелочный амперметр или мультиметр. Характеристики эталонного прибора занесите в табл. 2.2.

2.5. Соберите схему, приведенную на рис. 2.6. При $I_{\text{расч}} < 200$ мА вместо R_6 следует включать $R_{\text{эт1}}$ или $R_{\text{эт2}}$. Ключ K_2 установите в разомкнутое положение (рычажком вниз).

Таблица 2.2

Параметры эталонного прибора

Тип прибора	Предел измерения I_{max}	Класс точности γ

2.6. Включите ИП и убедитесь, что напряжение на его выходе равно нулю. При необходимости добейтесь нулевого напряжения на выходе источника вращением ручки «Voltage». Замкните ключ K_2 (рычажок вверх).

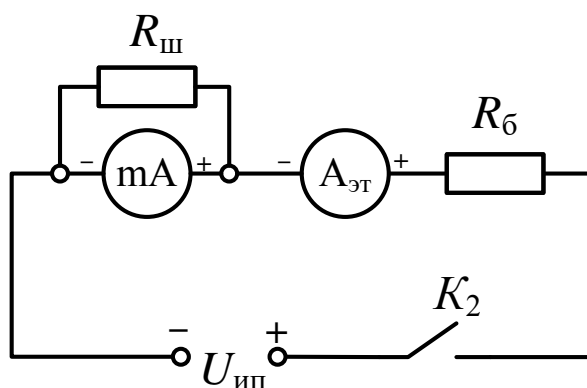


Рис. 2.6.

2.7. Вращая ручку «Voltage» снимите 6-8 показаний зашунтированного прибора (в делениях шкалы) и соответствующие им значения тока эталонного прибора (в единицах измерения прибора – амперах или миллиамперах). Данные занесите в табл. 2.3.

Таблица 2.3

	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_{\text{мА}}$, (в делениях шкалы)								
$I_{\text{Аэт}}$, (в единицах измерения прибора)								

2.8. Экспериментальные точки нанесите на график зависимости $I_{\text{Аэт}}$ (в единицах измерения прибора) от $I_{\text{мА}}$ (в делениях шкалы). Аппроксимируйте график прямой, проходящей через начало координат. Рассчитайте цену деления зашунтированного прибора как угловой коэффициент прямой:

$$C_{\text{эксп}} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta I_{\text{Аэт}}}{\Delta I_{\text{мА}}}.$$

2.9. Рассчитайте экспериментальные значения предела шкалы и коэффициента шунтирования прибора:

$$I_{\text{эксп}} = NC_{\text{эксп}};$$

$$k_{\text{эксп}} = \frac{I_{\text{эксп}}}{I_{\text{по}}}.$$

2.10. Вычислите относительные погрешности рассчитанных величин и занесите их в табл. 2.4.

Таблица 2.4

	Сопротивление шунта, Ом	Предел шкалы, мА	Коэффициент шунтирования, k	Цена деления, мА/дел
Расчетное значение				
Экспериментальное значение				
Относительная разность ε , %				

2.11. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Задание 3. Расчет добавочного сопротивления к вольтметру

3.1. Получите у преподавателя задание на расчет добавочного сопротивления к милли- или микроамперметру. Определите, при необходимости, внутреннее сопротивление прибора согласно методике, изложенной в Задании 1.

3.2. Вычислите напряжение полного отклонения (предел измерения) стрелки прибора:

$$U_{\text{по}} = R_{\text{п}} I_{\text{по}}.$$

Заполните табл. 2.5.

Таблица 2.5

Параметры прибора

Тип прибора	Кол-во делений N	Предел измерения $I_{\text{по}}$	Предел измерения $U_{\text{по}}$	Цена деления C , мА/дел	Класс точности γ

3.3. Запишите максимальное напряжение $U_{\text{расч}}$, который должен измерять прибор (задается преподавателем). Вычислите расчетные значения коэффициента деления и цены деления вольтметра:

$$n_{\text{расч}} = \frac{U_{\text{расч}}}{U_{\text{по}}}; \quad C_{\text{расч}} = \frac{U_{\text{расч}}}{N}.$$

3.4. Рассчитайте значение добавочного сопротивления:

$$R_{\text{д}} = R_{\text{п}} (n_{\text{расч}} - 1).$$

3.5. Соберите схему на рис. 2.7. Ключ K_2 установите в разомкнутое положение (рычажок вниз). В качестве R_d используйте магазин сопротивлений Р33, установленный на рассчитанное значение. В качестве эталонного вольтметра используйте мультиметр, установленный на предел «20 V».

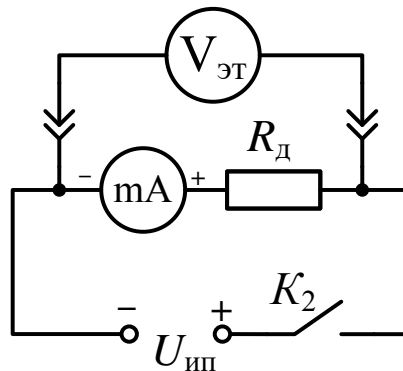


Рис. 2.7

3.6. Включите ИП и убедитесь, что напряжение на его выходе равно нулю. Замкните ключ K_2 (рычажок вверх).

3.7. Вращая ручку «Voltage» снимите 6-8 показаний прибора с добавочным сопротивлением (в делениях шкалы) и соответствующие им значения напряжения эталонного вольтметра (в вольтах). Данные занесите в табл. 2.6.

Таблица 2.6

	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{\text{мА}}$, (в делениях шкалы)								
$U_{\text{эт}}, V$								

3.8. Экспериментальные точки нанесите на график зависимости $U_{\text{эт}}$ (в вольтах) от $U_{\text{мА}}$ (в делениях шкалы). Аппроксимируйте график прямой, проходящей через начало координат. Рассчитайте цену деления прибора как угловой коэффициент прямой:

$$C_{\text{эсп}} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta U_{\text{эт}}}{\Delta U_{\text{мА}}}.$$

3.9. Рассчитайте экспериментальные значения предела шкалы зашунтированного прибора и коэффициента деления:

$$U_{\text{эсп}} = N C_{\text{эсп}}; \quad n_{\text{эсп}} = \frac{U_{\text{эсп}}}{U_{\text{по}}}.$$

3.10. Вычислите относительные разности между расчетными и экспериментальными величинами и занесите их в табл. 2.7.

Таблица 2.7

	Добавочное сопротивление, Ом	Предел шкалы, В	Коэффициент деления, n	Цена дел. В/дел
Расчетное значение				
Экспериментальное значение				
Относительная разность ε , %				

3.11. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия электроизмерительных приборов магнито-электрического и электромагнитного типа?
2. Какие типы электроизмерительных приборов используются в основном в цепях постоянного тока и почему?
3. Что называют током полного отклонения и напряжением полного отклонения электроизмерительного прибора?
4. Каким образом включают амперметр и вольтметр в электрическую цепь для измерения тока и напряжения?
5. Что такое шунт? Для чего и как он используется?
6. Что такое добавочное сопротивление? Для чего и как оно используется?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 24

Проверка правил Кирхгофа для цепей постоянного тока

Цель работы: экспериментальная проверка правил Кирхгофа для разветвленной электрической цепи постоянного тока; экспериментальная проверка закона сохранения энергии для электрической цепи.

Приборы и оборудование: лабораторный стенд для изучения цепей постоянного тока; регулируемый источник постоянного напряжения (ИП); цифровой мультиметр; магазин сопротивлений R33; провода соединительные с U-образными и штыревыми контактами.

Литература: [1, §65-§70]; [2, §5.5-5.8]; [3, §57-58].

Общие сведения

Правила Кирхгофа применяются для расчета сложных разветвленных цепей постоянного и переменного тока.

В электротехнике эти правила называют *законами*, что не вполне корректно, так как правила Кирхгофа являются следствием других, более общих, фундаментальных законов физики и могут быть выведены из них.

Для описания разветвленных электрических цепей используют специальные термины: *ветвь*, *узел* и *контур*.

Ветвь – участок электрической цепи, вдоль которого протекает один и тот же ток. Ветвь представляет собой один или несколько элементов электрической цепи, соединенных последовательно. Отрезок цепи с нулевым сопротивлением не образует ветвь. Схема на рис. 3.1 содержит 8 ветвей. Участок цепи между точками e и e' ветвью не является.

Узел – место соединения трех и более ветвей. На электрических схемах узел обозначают жирной точкой. Однако, не любая точка на схеме является узлом. Схема на рис. 3.1 имеет 5 узлов – a , b , c , d и e . Точка e' имеет одинаковый потенциал с точкой e и поэтому узлом не является. Сочетания точек, подобные e и e' следует считать и обозначать как один узел.

Контур – замкнутый путь, проходящий по одной или нескольким ветвям, в котором один из узлов является начальной и конечной точкой пути.

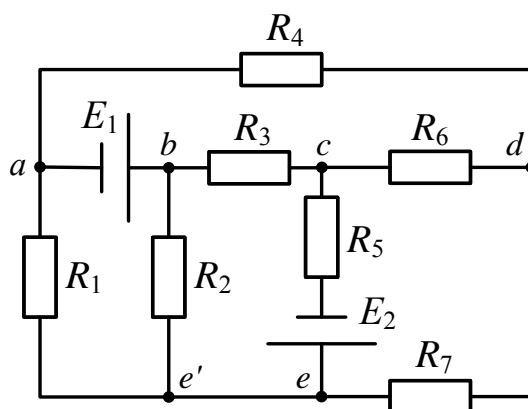


Рис. 3.1. Пример разветвленной электрической цепи

Примерами контуров на рис. 3.1 являются замкнутые пути:

$$a-R_4-d-R_6-c-R_3-b-E_1-a;$$

$$b-R_3-c-R_5-E_2-e-R_2-b;$$

$$d-R_7-e-R_2-b-E_1-a-R_4-d.$$

Правила Кирхгофа формулируются следующим образом.

I правило Кирхгофа. Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_k I_k = 0.$$

II правило Кирхгофа. В любом замкнутом контуре разветвленной электрической цепи алгебраическая сумма падений напряжений на участках этого контура равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре:

$$\sum_k I_k R_k = \sum_m E_m ;$$

где $I_k R_k$ – падение напряжения в k -й ветви; I_k – ток, протекающий в k -й ветви; R_k – суммарное сопротивление всех элементов k -й ветви, включая внутренние сопротивления входящих в неё источников ЭДС.

В общем случае анализ электрической схемы предполагает нахождение токов, напряжений и мощностей всех ее участков.

Наиболее распространенной задачей является нахождение токов в ветвях при известных значениях ЭДС и сопротивлений в схеме. Для ее решения рекомендуется использовать следующий алгоритм:

1. Определить число ветвей n и узлов m в схеме. Количество искомых токов всегда равно числу ветвей n .
2. Произвольно задаться направлениями токов в ветвях и обозначить их на схеме.
3. Выбрать $m-1$ узлов и составить для них уравнения по I правилу Кирхгофа. Токи, входящие в узлы, рекомендуется принимать со знаком «+», выходящие из узлов – со знаком «-».
4. Выбрать $n-(m-1)$ независимых контуров и составить для них уравнения по II правилу Кирхгофа. Контурные должны отличаться друг от друга как минимум одной ветвью. Для каждого контура необходимо задать направление обхода (по часовой или против часовой стрелки). Если ток в ветви совпадает с направлением обхода, то падение напряжения записывается со знаком «+», если не совпадает, со знаком «-». За направление ЭДС условно принимают направление от минусового к плюсовому выводу внутри источника. Если

направление ЭДС совпадает с направлением обхода контура, то соответствующий источник записывается со знаком «+» и наоборот.

5. Решить полученную систему линейных уравнений. Если полученный в результате расчетов ток имеет знак «-», то его истинное направление противоположно первоначально избранному.

Важнейшим критерием правильности расчета является выполнение закона сохранения энергии, которое выражается через **условие баланса мощностей**: суммарная мощность, отдаваемая источниками тока в любой момент времени, равна сумме мощностей, расходуемой во всех участках разветвленной электрической цепи.

Уравнение баланса мощностей в общем виде записывается следующим образом:

$$\sum E_m I_m = \sum I_k^2 R_k,$$

где E_m и I_m – соответственно, ЭДС источника и ток через него.

Если истинное направление тока через источник совпадает с направлением ЭДС, то источник работает в режиме генератора энергии и произведение $E_m I_m$ записывается со знаком «+». В противном случае, источник является потребителем энергии, и произведение $E_m I_m$ записывается со знаком «-». Все слагаемые правой части уравнения заведомо положительны.

Выполнение условия баланса мощностей в пределах допустимой погрешности подтверждает правильность проведенного расчета.

Физические основы и методика эксперимента

Для выполнения работы необходимо знать исходные параметры, определяющие состояние электрической схемы. Такими параметрами являются: сопротивления ветвей, ЭДС источников, внутренние сопротивления источников.

ЭДС источника можно определить с достаточной точностью прямым измерением (рис. 3.2.), если входное сопротивление вольтметра много больше внутреннего сопротивления источника. Используемый в работе цифровой вольтметр полностью соответствует этому условию, так как имеет входное сопротивление порядка 10^6 Ом, а внутренние сопротивления исследуемых в работе источников составляют величину порядка 10^2 Ом.

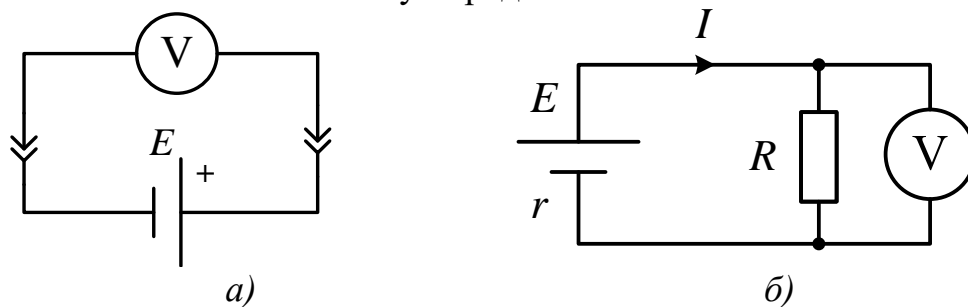


Рис. 3.2

Внутреннее сопротивление источника может быть определено только косвенными измерениями. В данной работе применен способ, суть которого заключается в следующем.

Для схемы на рис. 3.2 б можно записать уравнения для тока в цепи и напряжения на нагрузке:

$$I = \frac{E}{R + r}; \quad U_V = R \cdot I.$$

Решая эти уравнения совместно, получим выражение для внутреннего сопротивления источника

$$r = R \left(\frac{E}{U_V} - 1 \right). \quad (3.1)$$

Из уравнения следует, что если выполняется условие

$$R = r, \quad (3.2)$$

то показания вольтметра будут равны

$$U_V = \frac{E}{2}. \quad (3.3)$$

Таким образом, добившись соблюдения условия (3.3) и измерив R , определяют внутреннее сопротивление источника тока согласно (3.2).

На практике точное измерение токов во всех ветвях разветвленных схем встречает определенные сложности.

Амперметр включается последовательно в разрыв электрической цепи. Поэтому, если для проведения измерений имеется в наличии только один амперметр, то для измерения токов в каждой из ветвей необходимо перебирать схему. При этом, амперметр, обладая собственным сопротивлением, изменяет ток в ветви, что влияет на результат измерений. Использование отдельного амперметра для каждой ветви не всегда возможно, так как это удорожает и усложняет процесс измерений. Так, для схемы на рис. 3.1 потребовалось бы 8 амперметров.

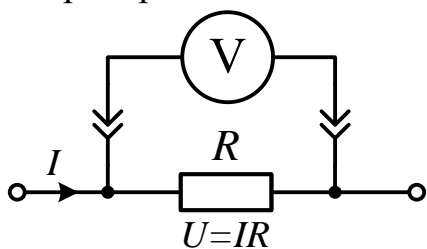


Рис. 3.3

На практике для измерения токов в сложных схемах часто используют специальные дополнительные сопротивления (рис. 3.3). Эти сопротивления, как и амперметр, включают последовательно с ветвью, в которой необходимо измерить ток. Величина дополнительного сопротивления должна быть много меньше суммарного сопротивления ветви.

Дополнительное сопротивление преобразует протекающий по нему ток в

напряжение, которое измеряется вольтметром. Если сопротивление равно 1 Ом, то показания вольтметра будут в точности равны значению измеряемого тока.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение ЭДС и внутренних сопротивлений

источников тока

1.1. Установите переключатель мультиметра на предел «20 V». Измерьте ЭДС источников E_1 и E_2 (рис. 3.2). Занесите в табл. 3.1. значения ЭДС, предел измерения и класс точности прибора на данном пределе.

1.2. Рассчитайте абсолютные погрешности прямого измерения ЭДС источника:

$$\sigma_E = \frac{\gamma}{100} \cdot U_{\max},$$

где γ – класс точности прибора для данного предела измерения; U_{\max} – предельное (максимальное) значение шкалы прибора.

1.3. Рассчитайте относительную погрешность прямого измерения ЭДС источника:

$$\varepsilon_E = \frac{\sigma_E}{U} \cdot 100\%,$$

где U – значение измеренной величины (показание прибора).

1.4. Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 3.1.

Таблица 3.1

	Предел измерения U_{\max}, B	Класс точности γ	σ_E, B	$\varepsilon_E, \%$
$E_1 = B$				
$E_2 = B$				

1.5. Соберите схему, приведенную на рис. 3.4. Ключ K_2 установите в разомкнутое положение (рычажок вниз). В качестве вольтметра используйте мультиметр, установленный на предел «20 V». На магазине сопротивлений установите значение $R_0 = 900$ Ом.

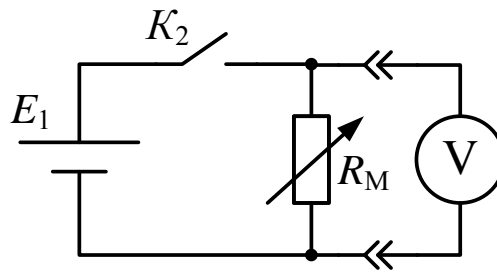


Рис. 3.4

1.6. Замкните ключ K_2 (рычажок вверх) и оцените показания вольтметра. Вращением рукоятей магазина « $\times 100$ », « $\times 10$ », и « $\times 1$ » добейтесь, чтобы показания вольтметра были близки к значению:

$$U_V = \frac{E_1}{2}.$$

Запишите значение напряжения U_V и соответствующее сопротивление R_M в табл. 3.2.

1.7. Рассчитайте внутреннее сопротивление источника:

$$r = R_M \left(\frac{E}{U_V} - 1 \right).$$

1.8. Рассчитайте абсолютную погрешность косвенного измерения внутреннего сопротивления источника:

$$\sigma_r = \sqrt{\left(\frac{E}{U_V} - 1 \right)^2 \sigma_R^2 + \left(\frac{R_M}{U_V} \right)^2 \sigma_E^2 + \left(\frac{-R_M \cdot E}{U_V^2} \right)^2 \sigma_U^2},$$

где σ_E – абсолютная погрешность прямого измерения ЭДС, $\sigma_R = 0,1$ Ом – абсолютная погрешность установленного сопротивления нагрузки, σ_U – абсолютная погрешность измерения напряжения на нагрузке (см. п. 1.2).

Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 3.2.

Таблица 3.2

	ЭДС, <i>B</i>	U_V , <i>B</i>	R_M , <i>Ом</i>	r , <i>Ом</i>	σ_r , <i>Ом</i>
Источник E_1					
Источник E_2					

1.9. Замените источник E_1 на E_2 и повторите пункты 1.5-1.8 задания.

1.10. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Задание 2. Определение токов в ветвях разветвлённой электрической цепи

2.1. Соберите схему, приведенную на рис. 3.5. Ключи K_1 и K_2 установите в разомкнутое положение (рычажками вниз). По заданию преподавателя на магазине сопротивлений установите значение 200-250 Ом.

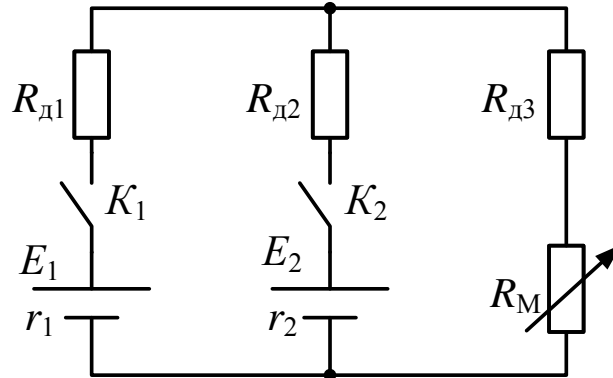


Рис. 3.5

2.2. Установите переключатель мультиметра на предел «200 mV». Замокните ключи K_1 и K_2 (рычажки вверх). Измерьте напряжения на дополнительных сопротивлениях $R_{д1}$, $R_{д2}$ и $R_{д3}$. Значения дополнительных сопротивлений $1 \pm 0,01$ Ом.

Занесите токи, соответствующие измеренным напряжениям в табл. 3.3.

Таблица 3.3

	$I_1, \text{мА}$	$I_2, \text{мА}$	$I_3, \text{мА}$
1. $R_M = \quad \text{Ом}$			
2. $R_M = \quad \text{Ом}$			
3. $R_M = \quad \text{Ом}$			

2.3. Повторите измерения еще для двух значений сопротивлений R_M в диапазоне 100-150 Ом и 20-50 Ом.

Задание 3. Обработка результатов

3.1. Для схемы на рис. 3.5, для замкнутого положения ключей, составьте систему уравнений по правилам Кирхгофа согласно алгоритму, приведенному в разделе «Общие сведения».

3.2. Выразите из системы токи I_1 , I_2 , I_3 в общем виде, как функции ЭДС источников, их внутренних сопротивлений и сопротивлений участков ветвей. Выражения для токов запишите в тетрадь.

3.3. Для каждого из трёх измерений по данным табл. 3.1 и известным значениям R_M из табл. 3.2 рассчитайте теоретические значения токов I_1, I_2, I_3 . Сравните их со значениями, полученными экспериментально.

3.4. Проверьте выполнение условия баланса мощностей для экспериментальных значений токов (табл. 3.3). Условие считается выполненным, если правая и левая части уравнения баланса мощностей различаются не более чем на 5%.

3.5. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока?
2. Что называют ветвью электрической цепи?
3. Что называют узлом электрической цепи?
4. Как формулируется и записывается I правило Кирхгофа? Следствием какого фундаментального физического закона оно является?
5. Что такое контур электрической цепи? Сколько независимых замкнутых контуров содержит схема на рис. 3.1?
6. Как формулируется и как записывается II правило Кирхгофа? Следствием каких физических законов оно является?
7. Сколько уравнений по I и II правилу Кирхгофа необходимо составить для расчета токов в разветвленной электрической цепи?
8. Как записывается уравнение баланса мощностей?
9. Каким образом измеряется внутреннее сопротивление источников тока в данной работе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 25

Исследование энергетических характеристик источника постоянного тока

Цель работы: экспериментальная проверка зависимости КПД, полной и полезной мощности источника ЭДС от сопротивления и тока во внешней цепи; определение внутреннего сопротивления источника по энергетическим характеристикам.

Приборы и оборудование: лабораторный стенд для изучения цепей постоянного тока; регулируемый источник постоянного напряжения (ИП); цифровой мультиметр; магазин сопротивлений Р33; провода соединительные с U-образными и штыревыми контактами.

Литература: [1, §64-65, §71-72]; [2, §5.5, §5.7-5.8]; [3, §60].

Общие сведения

Источник тока является преобразователем какого-либо вида энергии в электрическую энергию. Основными характеристиками источника тока являются *электродвижущая сила E* и *внутреннее сопротивление r* (см. л.р. №22). Эти характеристики являются независимыми и определяют вид энергетических характеристик источника. ЭДС источника можно измерить с помощью вольтметра с большим входным сопротивлением. Внутреннее сопротивление источника можно определить только косвенными измерениями.

Вырабатываемая источником тока электрическая энергия передается во внешнюю цепь – линию передачи и нагрузку (рис. 4.1).

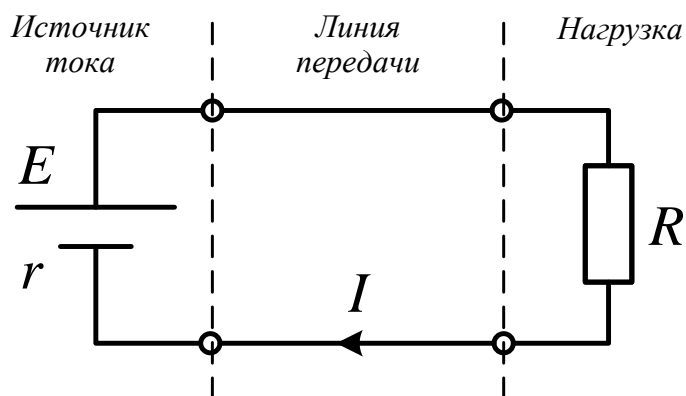


Рис. 4.1

Линия передачи связывает источник тока с нагрузкой. Главное требование к линии – минимальные потери при передаче энергии.

Нагрузка, как правило, преобразует получаемую электрическую энергию в энергию другого вида – механическую, тепловую, световую и т. д.

Каждый из элементов системы «источник тока – линия передачи – нагрузка» оказывает влияние на процесс передачи и преобразования энергии. Этот процесс количественно описывается *энергетическими характеристиками*.

Мощность источника тока есть полная мощность, развиваемая источником во всей цепи:

$$P = EI, \quad (4.1)$$

где E и I – ЭДС и ток источника.

Полезная мощность источника тока показывает, какая часть полной мощности может быть выделена во внешней цепи:

$$P_{\text{п}} = UI = I^2 R, \quad (4.2)$$

где U – напряжение на источнике, I – ток источника, R – сопротивление внешней цепи.

Коэффициент полезного действия источника тока:

$$\eta = \frac{P_{\text{п}}}{P}. \quad (4.3)$$

Часть полезной мощности необратимо теряется в линии передачи, выделяясь в виде тепла. Чтобы снизить эти потери, сопротивление линии стремятся делать как можно меньшим.

Физические основы и методика эксперимента

Рассмотрим цепь, состоящую из источника тока с электродвижущей силой E и внутренним сопротивлением r , нагруженного на активное сопротивление R (рис. 4.1). При этом будем полагать, что сопротивление линии передачи пренебрежимо мало ($R_{\text{л}} \approx 0$) и потерями энергии в ней можно пренебречь.

Ток в схеме определяется законом Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{E}{R + r}. \quad (4.4)$$

С учетом (5.4) мощность источника может быть выражена через параметры источника и сопротивление нагрузки:

$$P = \frac{E^2}{R + r}. \quad (4.5)$$

Полезная мощность, выделяемая на нагрузке:

$$P_{\text{п}} = \left(\frac{E}{R + r} \right)^2 R. \quad (4.6)$$

Отсюда КПД источника:

$$\eta = \frac{R}{R + r} \quad (4.7)$$

Из приведенных выражений видно, что внутреннее сопротивление оказывает на энергетические характеристики тем большее влияние, чем ближе значение r к сопротивлению нагрузки R . Это хорошо иллюстрируют графики на рис. 4.2, построенные для источника с $E = 1 \text{ В}$ и $r = 1 \text{ Ом}$.

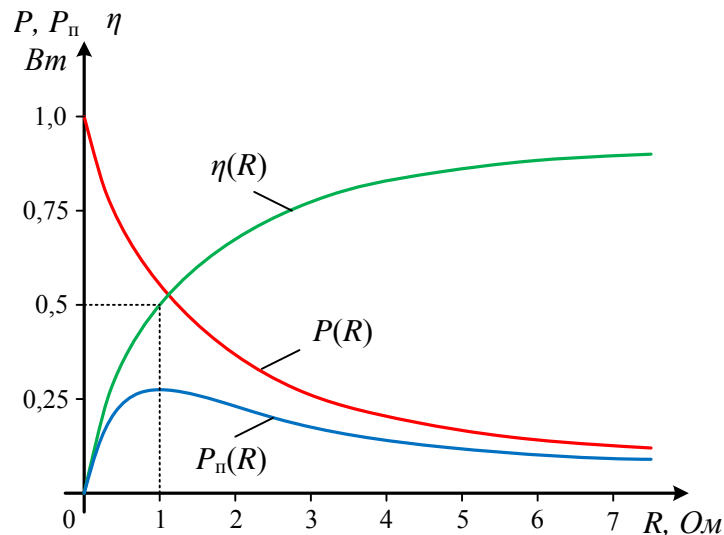


Рис. 4.2

Из графиков видно, что полезная мощность $P_{\text{п}}$, отдаваемая во внешнюю цепь, меньше полной мощности источника P во всем диапазоне сопротивлений нагрузки. Часть полной мощности безвозвратно теряется на внутреннем сопротивлении источника тока.

Зависимость $P_{\text{п}}(R)$ имеет выраженный максимум. Он соответствует режиму, при котором в нагрузке выделяется максимальная мощность.

Режим согласования по мощности возможен при соблюдении условия:

$$R = r \quad (4.8)$$

Как видно из графиков, в таком режиме $\eta = 0,5$. Таким образом, условие передачи максимальной мощности и условие достижения максимального КПД несовместимы.

Режим согласования по напряжению или **режим холостого хода** характеризуется тем, что на нагрузке стремятся получить максимальное напряжение. Такой режим реализуется при условии:

$$R \gg r \quad (4.9)$$

В этом случае напряжение на нагрузке близко к ЭДС источника, слабо зависит от сопротивления нагрузки, а КПД источника близок к единице. Полная и полезная мощность источника при этом близки к нулю.

Режим согласования по току или **режим короткого замыкания** позволяет получить максимальный ток от источника. Режим реализуется при условии:

$$R \ll r. \quad (4.10)$$

При этом ток источника слабо зависит от сопротивления нагрузки. Вся развиваемая мощность выделяется внутри источника в виде тепла, что может привести к выходу его из строя. Поэтому режим короткого замыкания в большинстве случаев является аварийным и его следует избегать.

На практике удобнее снимать энергетические характеристики в виде зависимостей от тока источника, так как в этом случае зависимости $P(I)$ и $\eta(I)$ являются линейными функциями от тока.

Для получения аналитических зависимостей от тока для полезной мощности и КПД запишем для схемы на рис. 4.1 уравнение, согласно второму правилу Кирхгофа:

$$E = IR + Ir.$$

Умножив обе части уравнения на ток I , получим **уравнение баланса мощностей электрической цепи**:

$$EI = I^2R + I^2r.$$

Баланс мощностей является следствием закона сохранения энергии: суммарная мощность, генерируемая источниками электрической энергии, равна суммарной мощности, потребляемой во всей цепи.

Из последнего уравнения выразим полезную мощность источника:

$$P_{\Pi} = EI - I^2r.$$

Подставив P_{Π} в (4.3), получим выражение для КПД как линейную функцию от тока I :

$$\eta = \frac{EI - I^2r}{EI} = 1 - \frac{r}{E}I.$$

Графики зависимостей КПД, полной и полезной мощности от тока для источника с $E = 1 \text{ В}$ и $r = 1 \text{ Ом}$ приведен на рис. 4.3.

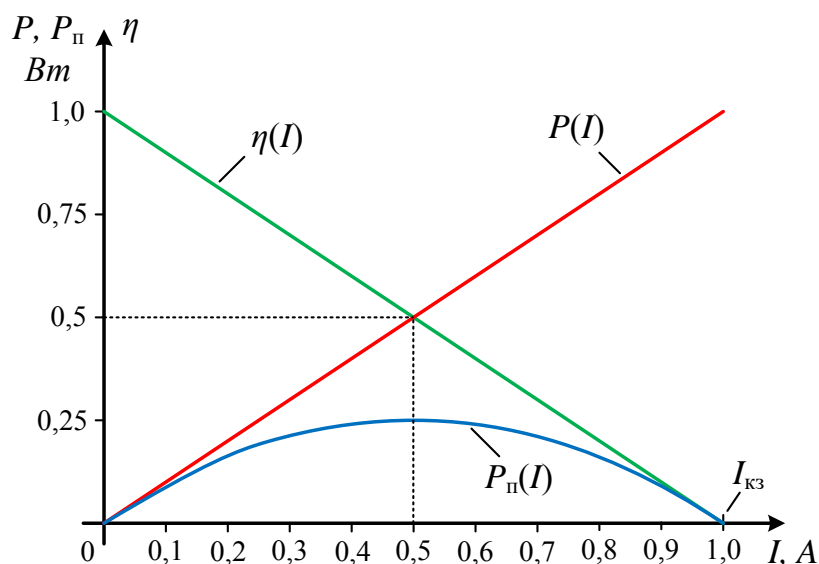


Рис. 4.3

Кривые $P(R)$, $P_{\pi}(R)$ и $\eta(R)$ на рис. 4.2 определены в диапазоне изменения R от 0 до ∞ . Функции $P(I)$, $P_{\pi}(I)$ и $\eta(I)$ ограничены по оси абсцисс током короткого замыкания $I_{кз}$.

Порядок выполнения Задания

Вариант 1

1.1. Установите переключатель мультиметра на предел «20 V». Измерьте ЭДС источника E_1 и занесите значение в тетрадь.

1.2. Соберите схему, приведенную на рис. 4.4. Ключ K_2 установите в разомкнутое положение (рычажок вниз). В качестве миллиамперметра используйте мультиметр, установленный на предел «20 mA». На магазине сопротивлений установите значение $R_0 = 5$ кОм.

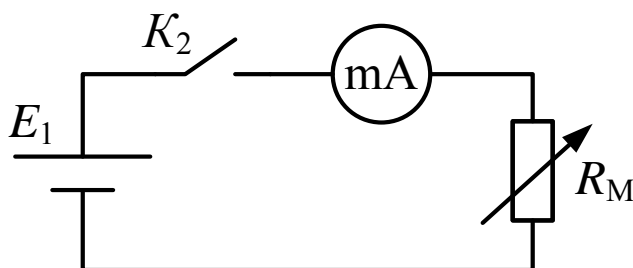


Рис. 4.4

1.3. Замкните ключ K_2 (рычажок вверх) и снимите показания миллиамперметра. Уменьшая сопротивление магазина, проведите 12-15 измерений для значений сопротивлений значений от R_0 до 0. При необходимости переключите предел измерения на «200 mA» (переключение предела проводите только при разомкнутом ключе K_2). Результаты измерений занесите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$R_M, \text{ Ом}$															
$I, \text{ mA}$															
$P, \text{ Вт}$															
$P_{\text{п}}, \text{ Вт}$															
$\eta, \%$															

1.4. Рассчитайте для каждой экспериментальной точки значения P , $P_{\text{п}}$ и η по формулам (4.1), (4.2) и (4.3) соответственно. Результаты расчетов занесите в табл. 4.1.

1.5. Постройте на одном графике экспериментальные зависимости $P(I)$, $P_{\text{п}}(I)$ и $\eta(I)$, задав на графике две оси ординат (для мощности и КПД) в удобном масштабе.

1.6. Из графиков, с учетом условия согласования по мощности (4.8) определите значение внутреннего сопротивления источника r .

1.7. По известным ЭДС и внутреннему сопротивлению источника постройте графики теоретических зависимостей $P(R)$, $P_{\text{п}}(R)$ и $\eta(R)$ в диапазоне от 0 до $10r$.

1.8. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Вариант 2

2.1. Установите переключатель мультиметра на предел «20 V». Измерьте ЭДС источника E_1 и занесите значение в тетрадь.

2.2. Соберите схему, приведенную на рис. 4.5. Ключ K_2 установите в разомкнутое положение (рычажок вниз). В качестве вольтметра используйте мультиметр, установленный на предел «20 V». На магазине сопротивлений установите значение $R_0 = 5 \text{ кОм}$.

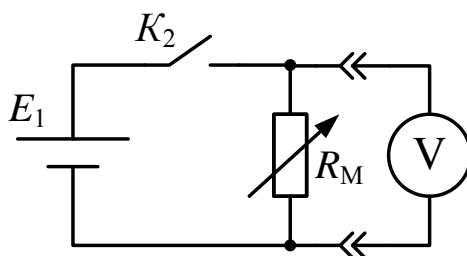


Рис. 4.5

2.3. Замкните ключ K_2 (рычажок вверх) и снимите показания вольтметра. Уменьшая сопротивление магазина, проведите 12-15 измерений для значений сопротивлений от R_0 до 1 Ом. При необходимости переключите предел измере-

ния на «200 mV» (переключение предела проводите только при разомкнутом ключе K_2). Результаты измерений занесите в табл. 4.2.

Таблица 4.2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$R_M, \text{ Ом}$															
$U, \text{ В}$															
$I, \text{ мА}$															
$P, \text{ Вт}$															
$P_{\text{п}}, \text{ Вт}$															
$\eta, \%$															

2.4. Рассчитайте для каждой экспериментальной точки токи I . Значения P , $P_{\text{п}}$ и η определите по формулам (4.1), (4.2) и (4.3) соответственно. Результаты расчетов занесите в табл. 4.2.

2.5. Постройте на одном графике экспериментальные зависимости $P(I)$, $P_{\text{п}}(I)$ и $\eta(I)$ задав на графике две оси ординат (для мощности и КПД) в удобном масштабе.

2.6. Из графиков, с учетом условия согласования по мощности (4.8) определите значение внутреннего сопротивления источника r .

2.7. По известным ЭДС и внутреннему сопротивлению источника постройте графики теоретических зависимостей $P(R)$, $P_{\text{п}}(R)$ и $\eta(R)$ в диапазоне от 0 до $10r$.

2.8. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое источник тока? Назовите основные характеристики источника тока, раскройте их физический смысл.

2. Перечислите режимы согласования электрической цепи и дайте характеристику каждому режиму.

3. Выведите зависимость КПД источника тока с внутренним сопротивлением r от сопротивления нагрузки.

4. Можно ли рассчитывать КПД по внешним характеристикам источника? Какие данные для этого необходимы?

5. При каком условии полезная мощность источника максимальна? Чему при этом равен КПД источника?

6. Почему не может быть использована вся мощность, развиваемая источником тока?

7. Докажите, что зависимость $\eta(I)$ является линейной.

8. Докажите математически, что наибольшая полезная мощность выделяется при равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений цепи.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ

**для отчета по лабораторной работе №22
«Измерение параметров источника постоянного тока»**

Студент: _____

Группа: _____

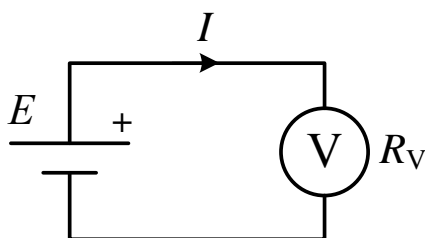
Магнитогорск

_____ г.

Цель работы: экспериментальное определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника постоянного тока различными методами; экспериментальная проверка закона Ома для замкнутой цепи.

Задание 1. Измерение ЭДС источника тока вольтметром

Схема измерительной цепи



Расчетные формулы

$$\sigma =$$

$$\varepsilon =$$

Расчеты

$$\sigma_{E_1} =$$

$$\sigma_{E_2} =$$

$$\varepsilon_{E_1} =$$

$$\varepsilon_{E_2} =$$

$$\sigma_{E_{1,2}} =$$

$$\varepsilon_{E_{1,2}} =$$

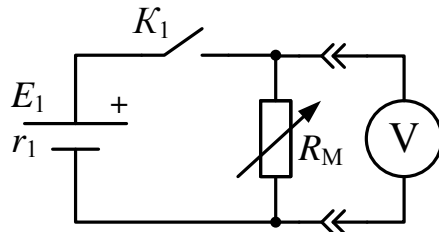
Результаты измерений и расчетов

Таблица 1.1

	U_V, B	Предел измерения U_{max}, B	Класс точности γ	σ, B	$\varepsilon, \%$
E_1					
E_2					
$E_{1,2}$					

Задание 2. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления по нагрузочной характеристике источника тока

Схема измерительной цепи



Расчетные формулы

$$I =$$

$$\sigma(U) =$$

$$\sigma(I) =$$

Экспериментальные и расчетные данные для источника E_1

Таблица 1.2(1)

	1	2	3	4	5	6	7	8
R_M , Ом								
U , В								
I , мА								
Предел измерения X_{max} , В								
Класс точности γ								
$\sigma(U)$, В								
$\sigma(I)$, мА								

Расчеты

(для $\sigma(U)$ и токов I приводить необязательно)

$$\sigma(I)_1 =$$

$$\sigma(I)_5 =$$

$$\sigma(I)_2 =$$

$$\sigma(I)_6 =$$

$$\sigma(I)_3 =$$

$$\sigma(I)_7 =$$

$$\sigma(I)_4 =$$

$$\sigma(I)_8 =$$

Экспериментальные и расчетные данные для источника E_2

Таблица 1.2(2)

	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_M, \text{ Ом}$								
$U, \text{ В}$								
$I, \text{ мА}$								
Предел измерения $X_{\text{max}}, \text{ В}$								
Класс точности γ								
$\sigma(U), \text{ В}$								
$\sigma(I), \text{ мА}$								

Расчеты

(для $\sigma(U)$ и токов I приводить необязательно)

$\sigma(I)_1 =$

$\sigma(I)_5 =$

$\sigma(I)_2 =$

$\sigma(I)_6 =$

$\sigma(I)_3 =$

$\sigma(I)_7 =$

$\sigma(I)_4 =$

$\sigma(I)_8 =$

Графическое определение E и r

Уравнения прямых:

1)

2)

Значения ЭДС и внутреннего сопротивления

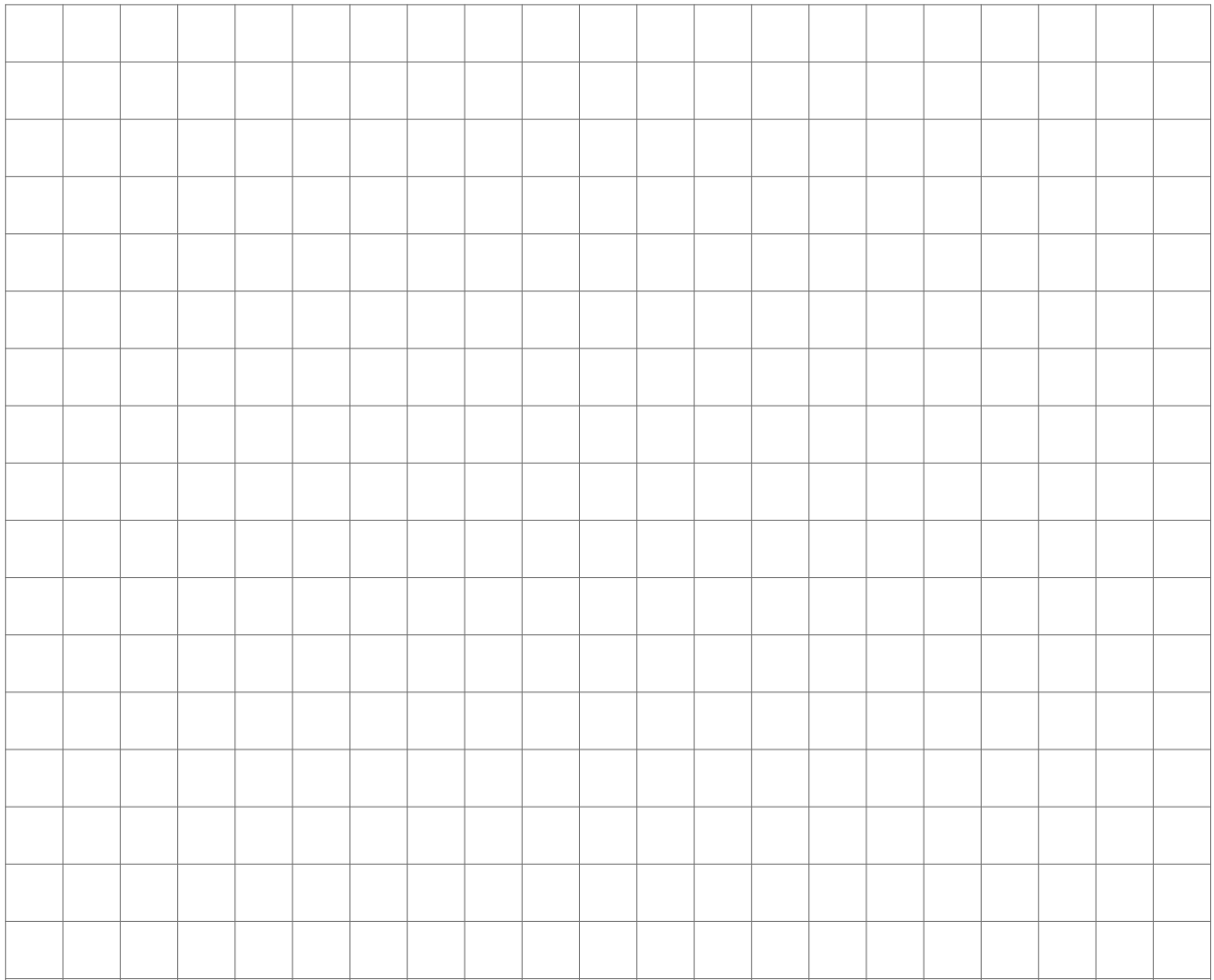
$E_1 =$

$r_1 =$

$E_2 =$

$r_2 =$

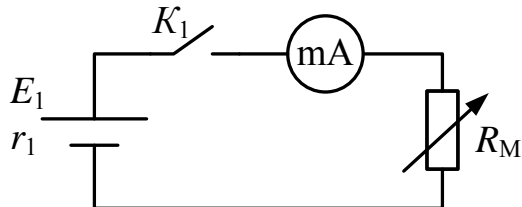
Графики зависимости $U=f(I)$



Выводы:

Задание 3. Экспериментальная проверка закона Ома для замкнутой цепи. Измерение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока методом известных сопротивлений.

Схема измерительной цепи



Расчетные формулы

$$E =$$

$$\sigma(I_{mA}) =$$

$$r =$$

$$\sigma(1/I_{mA}) =$$

Экспериментальные и расчетные данные для источника E_1

Таблица 1.3(1)

	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_M, \text{ Ом}$								
$I, \text{ mA}$								
$\sigma(I_{mA})$								
$1/I, (\text{mA})^{-1}$								
$\sigma(1/I_{mA})$								

Расчеты

$$\sigma(I_{mA})_1 =$$

$$\sigma(I_{mA})_5 =$$

$$\sigma(I_{mA})_2 =$$

$$\sigma(I_{mA})_6 =$$

$$\sigma(I_{mA})_3 =$$

$$\sigma(I_{mA})_7 =$$

$$\sigma(I_{mA})_4 =$$

$$\sigma(I_{mA})_8 =$$

$$\sigma(1/I_{mA})_1 =$$

$$\sigma(1/I_{mA})_5 =$$

$$\sigma(1/I_{mA})_2 =$$

$$\sigma(1/I_{mA})_6 =$$

$$\sigma(1/I_{mA})_3 =$$

$$\sigma(1/I_{mA})_7 =$$

$$\sigma(1/I_{mA})_4 =$$

$$\sigma(1/I_{mA})_8 =$$

Экспериментальные и расчетные данные для источника E_2

Таблица 1.3(2)

	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_M, \text{ Ом}$								
$I, \text{ mA}$								
$\sigma(I_{\text{mA}})$								
$1/I, (\text{mA})^{-1}$								
$\sigma(1/I_{\text{mA}})$								

Расчеты

(для $1/I$ приводить необязательно)

$$\sigma(I_{\text{mA}})_1 =$$

$$\sigma(I_{\text{mA}})_5 =$$

$$\sigma(I_{\text{mA}})_2 =$$

$$\sigma(I_{\text{mA}})_6 =$$

$$\sigma(I_{\text{mA}})_3 =$$

$$\sigma(I_{\text{mA}})_7 =$$

$$\sigma(I_{\text{mA}})_4 =$$

$$\sigma(I_{\text{mA}})_8 =$$

$$\sigma(1/I_{\text{mA}})_1 =$$

$$\sigma(1/I_{\text{mA}})_5 =$$

$$\sigma(1/I_{\text{mA}})_2 =$$

$$\sigma(1/I_{\text{mA}})_6 =$$

$$\sigma(1/I_{\text{mA}})_3 =$$

$$\sigma(1/I_{\text{mA}})_7 =$$

$$\sigma(1/I_{\text{mA}})_4 =$$

$$\sigma(1/I_{\text{mA}})_8 =$$

Графическое определение E и r

Уравнения прямых:

1)

2)

Значения ЭДС и внутреннего сопротивления

$$E_1 =$$

$$r_1 =$$

$$E_2 =$$

$$r_2 =$$

Графики зависимости $R=f(1/I)$



Расчет E и r по результатам двух измерений

$$E_1 =$$

$$r_1 =$$

$$E_2 =$$

$$r_2 =$$

Результаты

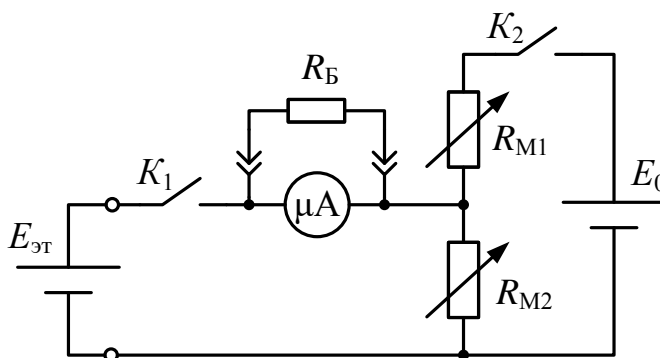
Таблица 1.4

	$E_1, В$	$E_2, В$	$r_1, Ом$	$r_2, Ом$
Расчетное значение				
Экспериментальное значение				
Относительная разность $\epsilon, \%$				

Выводы:

Задание 4. Измерение ЭДС источника методом компенсации Вариант 1

Схема цепи



Экспериментальные данные и расчетные формулы

Напряжение на делителе $U_0 =$

Расчетная формула $E =$

Таблица 1.4.1

	$R'_{M2}, \text{ Ом}$	$R_{M2}, \text{ Ом}$	Значение ЭДС, В
Источник $E_{ЭГ}$		—	
Источник E_1	—		
Источник E_2	—		

Результаты

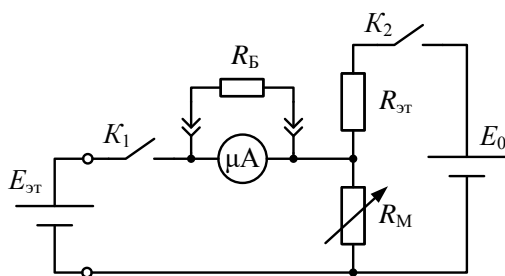
Сравните полученные значения с результатами прямых измерений проведенных в

Задании 1.

	Прямое измерение, В	Косвенное измерение, В	Относительная разность, %
Источник E_1			
Источник E_2			

Вариант 2

Схема цепи



Экспериментальные данные и расчетные формулы

Напряжение на делителе $U_0 =$

Сопротивление $R_{эТ} =$

Расчетная формула $E =$

Таблица 1.4.2

	$R'_M, \text{ Ом}$	$R_M, \text{ Ом}$	Значение ЭДС, В
Источник $E_{эТ}$		—	
Источник E_1	—		
Источник E_2	—		

Результаты

Сравните полученные значения с результатами прямых измерений проведенных в Задании 1.

	Прямое измерение, В	Косвенное измерение, В	Относительная разность, %
Источник E_1			
Источник E_2			

Выводы:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ

**для отчета по лабораторной работе №23
«Расширение предела измерения амперметра и вольтметра
постоянного тока»**

Студент: _____

Группа: _____

Магнитогорск

_____ г.

Цель работы: экспериментальная проверка методики расчета шунта и добавочного сопротивления к электроизмерительному прибору; экспериментальное исследование характеристик амперметра и вольтметра с расширенными пределами измерения.

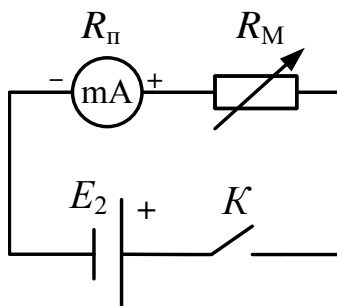
Задание 1. Определение внутреннего сопротивления прибора

Таблица 2.1

Характеристики шунтируемого прибора

Тип прибора	Количество делений, N	Предел измерения, $I_{по}, \text{mA}$	Цена деления, C	Класс точности, γ

Схема измерительной цепи



Расчетные формулы

$$R_{ш} = \quad \quad \quad \sigma(U_{\text{mA}}) =$$

$$\sigma(U_M) = \quad \quad \quad \sigma(R_{ш}) =$$

Экспериментальные данные

Таблица 2.2

Результаты измерений

R_M, Om	U_{mA}, B	U_M, B

Расчеты

$$R_{ш} = \quad \quad \quad \sigma(U_{\text{mA}}) =$$

$$\sigma(U_M) = \quad \quad \quad \sigma(R_{ш}) =$$

Задание 2. Расчет шунта и расширение предела измерения милли/микроамперметра

Заданное значение предела измерения $I_{расч} =$

Расчетные формулы

$$k_{расч} =$$

$$R_{расч} =$$

$$C_{расч} =$$

$$I_{эксп} =$$

$$k_{эксп} =$$

Расчеты

$$k_{расч} =$$

$$C_{расч} =$$

$$R_{расч} =$$

Схема измерительной цепи

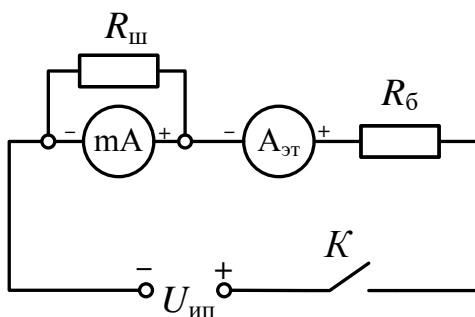


Таблица 2.3

Параметры эталонного прибора

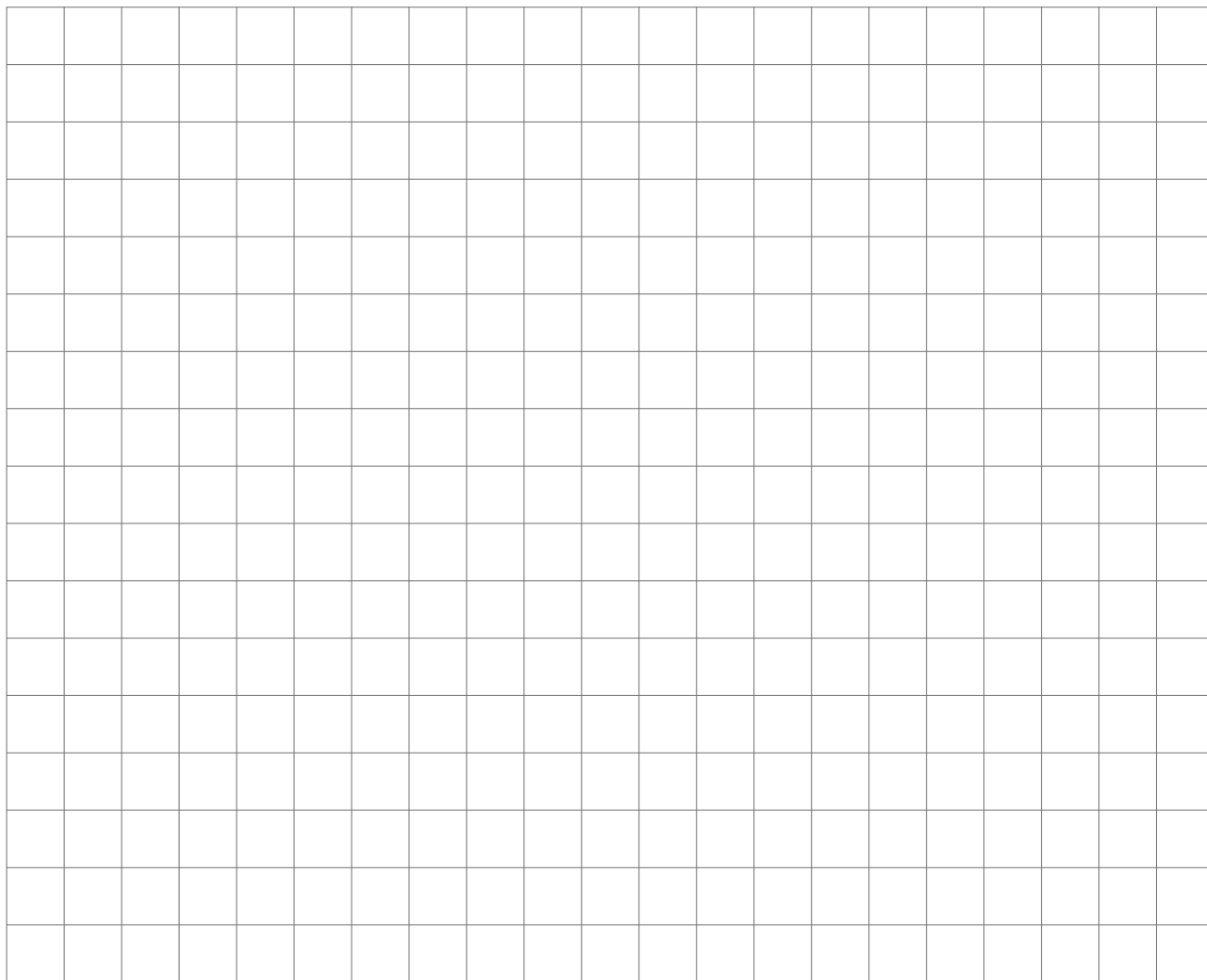
Тип прибора	Предел измерения I_{max}, A	Класс точности γ

Экспериментальные данные

Таблица 2.4

	1	2	3	4	5	6	7	8
I_{mA} , (в делениях шкалы)								
$I_{AЭТ}$, (в единицах измерения прибора)								

График зависимости $I_{AЭТ}$ (в единицах измерения прибора)
от I_{mA} (в делениях шкалы)



Задание 3. Расчет добавочного сопротивления к вольтметру

Заданное значение предела измерения $U_{\text{расч}} =$

Таблица 2.6

Характеристики прибора

Тип прибора	Кол. делений N	Предел измерения $I_{\text{по}}, \text{A}$	Предел измерения $U_{\text{по}}, \text{B}$	Цена деления $C, \text{mA/дел}$	Класс точности γ

Расчетные формулы

$$U_{\text{по}} =$$

$$n_{\text{расч}} =$$

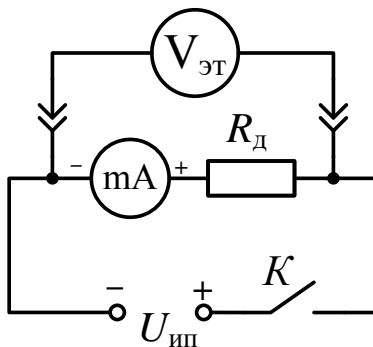
$$C_{\text{расч}} =$$

$$R_{\text{д}} =$$

$$U_{\text{эсп}} =$$

$$n_{\text{эсп}} =$$

Схема измерительной цепи

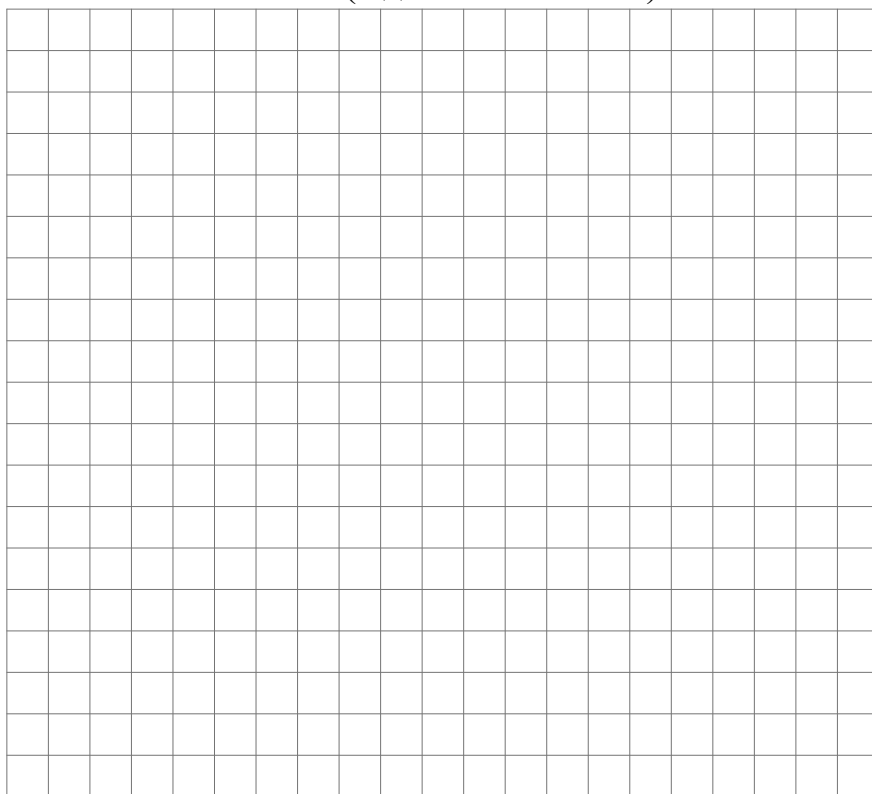


Экспериментальные данные

Таблица 2.7

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{мА}},$ (в делениях шкалы)										
$U_{\text{эт}}, \text{B}$										

**График зависимости $U_{\text{эт}}$ (в вольтах)
от U_{mA} (в делениях шкалы)**



Расчеты

$$U_{\text{по}} =$$

$$n_{\text{расч}} =$$

$$R_{\text{д расч}} =$$

$$C_{\text{эксп}} =$$

$$U_{\text{эксп}} =$$

$$R_{\text{д эксп}} =$$

$$C_{\text{расч}} =$$

$$n_{\text{эксп}} =$$

$$\varepsilon(R_{\text{д}}) = \frac{R_{\text{д расч}} - R_{\text{д эксп}}}{R_{\text{д расч}}} \cdot 100\% =$$

$$\varepsilon(U_{\text{по}}) = \frac{U_{\text{по}} - U_{\text{эксп}}}{U_{\text{по}}} \cdot 100\% =$$

$$\varepsilon(n) = \frac{n_{\text{расч}} - n_{\text{эксп}}}{n_{\text{расч}}} \cdot 100\% =$$

$$\varepsilon(C) = \frac{C_{\text{расч}} - C_{\text{эксп}}}{C_{\text{расч}}} \cdot 100\% =$$

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ

**для отчета по лабораторной работе №24
«Проверка правил Кирхгофа для цепей постоянного тока»**

Студент: _____

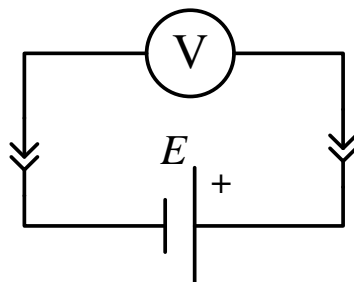
Группа: _____

Магнитогорск
_____ г.

Цель работы: экспериментальная проверка правил Кирхгофа для разветвленной электрической цепи постоянного тока; экспериментальная проверка закона сохранения энергии для электрической цепи.

Задание 1. Определение ЭДС и внутренних сопротивлений источников тока

Схема для измерения ЭДС



Расчетные формулы

$$\sigma_E =$$

$$\varepsilon_E =$$

$$r =$$

$$\sigma_r =$$

Экспериментальные и расчетные данные

Таблица 3.1

	Предел измерения U_{\max} , В	Класс точности γ	σ_E , В	ε_E , %
$E_1 =$ В				
$E_2 =$ В				

Расчеты

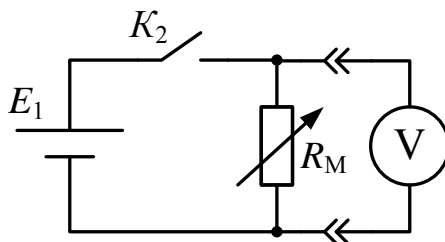
$$\sigma_{E_1} =$$

$$\varepsilon_{E_1} =$$

$$\sigma_{E_2} =$$

$$\varepsilon_{E_2} =$$

Схема для определения внутреннего сопротивления



Экспериментальные и расчетные данные

Таблица 3.2

	ЭДС, В	U_V , В	R_M , Ом	r , Ом	σ_r , Ом
Источник E_1					
Источник E_2					

Расчеты

$$r_1 =$$

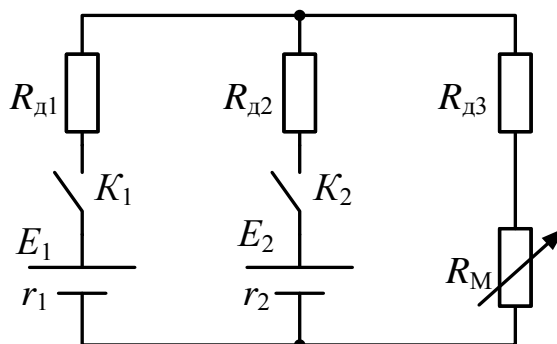
$$r_1 =$$

$$\sigma_{r_1} =$$

$$\sigma_{r_2} =$$

Задание 2. Определение токов в ветвях разветвлённой электрической схемы

Схема измерительной цепи



Экспериментальные данные

Таблица 3.3

	$I_1, \text{мА}$	$I_2, \text{мА}$	$I_3, \text{мА}$
1. $R_{M1} = \text{ Ом}$			
2. $R_{M2} = \text{ Ом}$			
3. $R_{M3} = \text{ Ом}$			

Задание 3. Обработка результатов

Система уравнений по законам Кирхгофа

{

Аналитические выражения для токов I_1, I_2, I_3 :

$I_1 =$

$I_2 =$

$I_3 =$

Расчеты

Токи в цепи при сопротивлении R_{M1}

$I_1 =$

$I_2 =$

$I_3 =$

Токи в цепи при сопротивлении R_{M2}

$I_1 =$

$I_2 =$

$I_3 =$

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ

для отчета по лабораторной работе №25
«Исследование энергетических характеристик источника
постоянного тока»

Студент: _____

Группа: _____

Магнитогорск

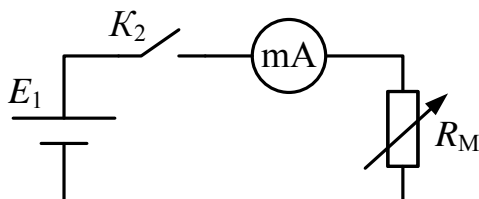
_____ г.

Цель работы: экспериментальная проверка зависимости КПД, полной и полезной мощности источника ЭДС от сопротивления и тока во внешней цепи; определение внутреннего сопротивления источника по энергетическим характеристикам.

Вариант 1

Измеренное значение ЭДС источника $E =$

Схема измерительной цепи



Расчетные формулы

$$P(I) =$$

$$P_{\text{п}}(I) =$$

$$\eta(I) =$$

Экспериментальные и расчетные данные

Таблица 4.1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$R_{\text{М}}, \text{Ом}$															
$I, \text{мА}$															
$P, \text{Вт}$															
$P_{\text{п}}, \text{Вт}$															
$\eta, \%$															

Расчеты

Приведите расчет для нескольких значений $P(I)$, $P_{\text{п}}(I)$ и $\eta(I)$.

$$P_1(I) =$$

$$P_{\text{п}1}(I) =$$

$$\eta_1(I) =$$

$$P_2(I) =$$

$$P_{\text{п}2}(I) =$$

$$\eta_2(I) =$$

$$P_3(I) =$$

$$P_{\text{п}3}(I) =$$

$$\eta_3(I) =$$

$$P_4(I) =$$

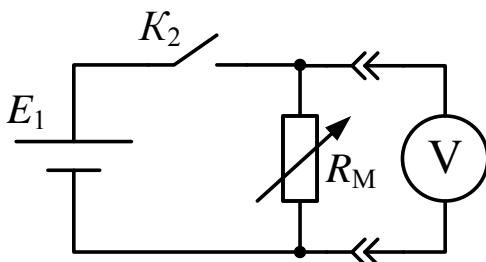
$$P_{\text{п}4}(I) =$$

$$\eta_4(I) =$$

Вариант 2

Измеренное значение ЭДС источника $E =$

Схема измерительной цепи



Расчетные формулы

$$I =$$

$$P(I) =$$

$$P_n(I) =$$

$$\eta(I) =$$

Экспериментальные и расчетные данные

Таблица 4.2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$R_M, \text{ Ом}$															
$U, \text{ В}$															
$I, \text{ мА}$															
$P, \text{ Вт}$															
$P_n, \text{ Вт}$															
$\eta, \%$															

Расчеты

Приведите расчет для нескольких значений $P(I)$, $P_n(I)$ и $\eta(I)$. Расчет токов I приводить необязательно.

$$P_1(I) =$$

$$P_{n1}(I) =$$

$$\eta_1(I) =$$

$$P_2(I) =$$

$$P_{n2}(I) =$$

$$\eta_2(I) =$$

$$P_3(I) =$$

$$P_{n3}(I) =$$

$$\eta_3(I) =$$

$$P_4(I) =$$

$$P_{n4}(I) =$$

$$\eta_4(I) =$$

Расчетные данные для диапазона от 0 до 10r

$R, Ом$														
$P, Вт$														
$P_{п}, Вт$														
$\eta, \%$														

Теоретические зависимости $P(R)$, $P_{п}(R)$ и $\eta(R)$



Выводы

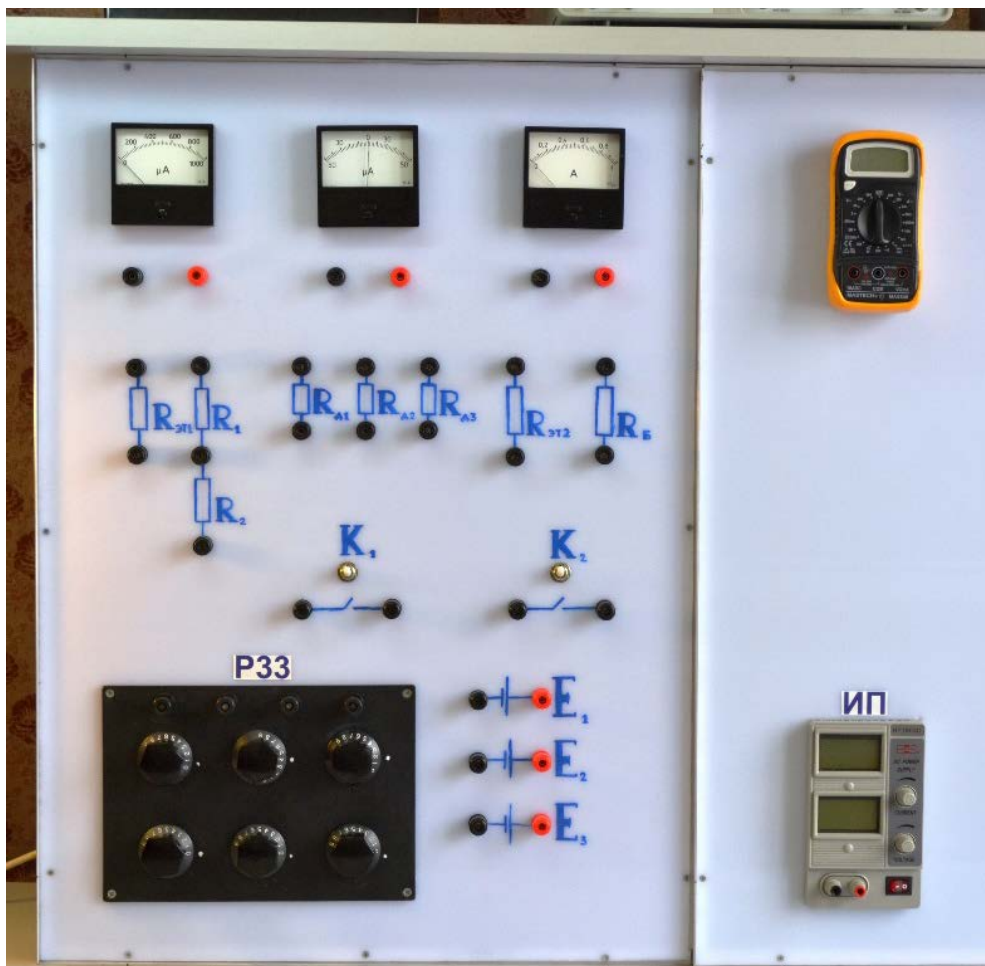
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашников С.Г. Электричество: Учебн. пособие. – 6-е изд. стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 624 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: в 5 кн. Кн. 2: Электричество и магнетизм: учеб. пособие для втузов / И.В. Савельев. – М.: Астрэль, 2008. – 336 с.: ил.
3. Телесин Р.В., Яковлев В.Ф. Электричество. 2-е изд., перераб. Учебное пособие. – М., «Просвещение», 1969.
4. Лабораторный практикум по общей и экспериментальной физике: Учебное пособие / Под ред. Е.М. Гершензона и А.Н. Мансурова. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 464 с.: ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приборы и оборудование, используемые при выполнении лабораторных работ

1. Лабораторный стенд для изучения цепей постоянного тока



В состав лабораторного стенда входят: миллиамперметр с пределом $0,5 \text{ мА}$ или 1 мА ; микроамперметр с двухсторонней шкалой (гальванометр); амперметр с пределом 1 А или 3 А ; сопротивления R_1 и R_2 одинакового значения; эталонные резисторы с известными сопротивлениями $R_{\text{эт}1}$ и $R_{\text{эт}1}$; три одинаковых дополнительных сопротивления $R_{\text{д}1}$, $R_{\text{д}1}$, $R_{\text{д}1}$ значением 1 Ом ; балластное сопротивление $R_{\text{б}}$ большой мощности со значением $5 \dots 10 \text{ Ом}$; ключи K_1 и K_2 ; источники напряжения E_1 , E_2 ; эталонный источник $E_{\text{эт}}$ с известным значением ЭДС; декадный магазин сопротивлений P33; цифровой мультиметр; регулируемый источник напряжения ИП.

К элементам стенда можно подключиться через выходные клеммы с помощью соединительных проводов с U-образными или штыревыми контактами.

2. Мультиметр цифровой MAS 830



Предел	Разрешение	Класс точности
Постоянное напряжение (V=)		
200 mV	0,1 мВ	0,5
2 V	1 мВ	0,5
20 V	10 мВ	0,5
Постоянный ток (A=)		
2 mA	1 мкА	1,0
20 mA	10 мкА	1,0
200 mA	0,1 mA	1,0
Сопротивление (Ω)		
200 Ω	0,1 Ω	0,8
2 kΩ	1 Ω	0,8
20 kΩ	10 Ω	0,8

Соединительные провода подключаются: «Плюс» (красный) к гнезду «COM», «Минус» (черный) к гнезду «VΩmA».

ВНИМАНИЕ! Переключение предела измерения производится только при отключенном от измерительной цепи приборе или обесточенной схеме!

3. Декадный магазин сопротивлений P33



Класс точности: 0,2

Диапазон изменения сопротивления:
0,1...99999,9 Ом.

Максимально допустимая мощность на одну ступень:
0,5 Вт.

При проведении измерений соединительные провода подключаются к двум крайним клеммам магазина. Значение требуемого сопротивления устанавливается вращением рукоятей декад. Цифра на рукояти должна быть установлена напротив стрелки с множителем, расположенной справа от рукояти.

4. Регулируемый источник питания HY1803D (ИП)



Выходное напряжение: $0 \dots 18$ В

Выходной ток: $0 \dots 3$ А.

Плавная регулировка напряжения с разрешением $0,1$ В.

Встроенная защита от короткого замыкания.

Питание от сети 220 В.

«Плюс» источника – правая клемма прибора (красная). «Минус» источника – левая клемма прибора (черная).

Отображение напряжения и тока источника осуществляется жидкокристаллическими индикаторами: верхний – сила тока, А; нижний – напряжение, В.

Регулировка напряжения осуществляется рукояткой «Volume». Верхняя рукоятка «Current» предназначена для установки ограничения максимального тока источника. Ее следует устанавливать в среднее положение.

6. Измеритель RLC «АКИП-6101»



Диапазон измерений:

сопротивления $0,1$ МОм – 1 ГОм;

индуктивности $0,1$ мкГн – 10 кГн;

емкости $0,1$ пФ – 10 мФ.

Базовая погрешность $0,3$ %.

Измеритель используется для точного измерения сопротивлений шунтов и дополнительных сопротивлений в лабораторных работах №23 и №24.

Проводить измерения следует под руководством преподавателя или лаборанта.

5. Соединительные провода и шунты



Провода с
U-образными контактами



Провода со штыревыми
контактами



Шунты к л.р. №23

Учебное текстовое электронное издание

**Вечеркин Максим Викторович
Кривко Оксана Викторовна**

**ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА:
практикум по физике**

Учебное пособие

0,97 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2022 год
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Кафедра физики
Центр электронных образовательных ресурсов и
дистанционных образовательных технологий
e-mail: ceor_dot@mail.ru