

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Баламирзоев Назим Лидович
Должность: Ректор
Дата подписания: 06.10.2025 22:12:05
Уникальный программный ключ:
5cf0d6f89e80f49a334f6a4ba38e91f3320b9926

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФГБОУ ВО
ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет КТВТиЭ

Кафедра «Теоретической и общей электротехники»

***Учебно-методические указания
к выполнению лабораторных работ №1, №2, №3
по дисциплине «Электротехника»
для студентов направления подготовки бакалавров 27.03.04-«Управление в
технических системах» (часть I)***

Махачкала 2019

УДК 621.3

Учебно-методические указания к выполнению лабораторных работ №1, №2, №3 по дисциплине «Электротехника» для студентов направления подготовки бакалавров 27.03.04- «Управление в технических системах» (часть 1). -Махачкала: ДГТУ, 2019-с.25.

Учебно-методические указания являются учебным руководством к выполнению лабораторных работ с использованием лабораторных стендов по дисциплине «Электротехника». Лабораторная работа №1 посвящена изучению элементов электрической цепи и приборам для измерения их характеристик. Лабораторная работа №2 посвящена исследованию линейных электрических цепей постоянного тока. Лабораторная работа №3 посвящена исследованию электрической цепи переменного тока с последовательным соединением элементов.

Составители: Исмаилов Т.А., д.т.н., профессор каф. ТиОЭ.,

Евдулов Д.В., к.т.н., ст. преподаватель каф. ТиОЭ,

Евдулов О.В., к.т.н., доцент каф. ТиОЭ,

Шангереева Б.А., к.т.н., доцент каф. ТиОЭ,

Миспахов И.Ш. к.т.н., ст. преподаватель каф. ТиОЭ

Рецензенты:

д.т.н., профессор кафедры ЭЭСиВИЭ

Асланов Г.К.

Зав. лаб. информационных технологий в энергетике
ФГБУН «Институт проблем геотермии» ДНЦ РАН,
д.т.н.

Кобзаренко Д.Н.

Печатается согласно постановлению ученого Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» от ____ 2019 г.

Лабораторная работа №1 «Элементы электрической цепи, приборы для измерения их характеристик»

Цель работы: изучение электроизмерительных приборов, используемых в лабораторных работах. Получение представлений о пределе измерения и цене деления, абсолютной и относительной погрешности, условиях эксплуатации и других характеристиках стрелочных электроизмерительных приборов, получение навыков работы с цифровыми измерительными приборами.

1. Краткие теоретические сведения.

Электромагнитные процессы, протекающие в электротехнических устройствах, как правило, достаточно сложны. Однако во многих случаях, их основные характеристики можно описать с помощью таких интегральных понятий, как: напряжение, ток, электродвижущая сила (ЭДС). При таком подходе совокупность электротехнических устройств, состоящую из соответствующим образом соединенных источников и приемников электрической энергии, предназначенных для генерации, передачи, распределения и преобразования электрической энергии и (или) информации, рассматривают как **электрическую цепь**. Электрическая цепь состоит из отдельных частей (объектов), выполняющих определенные функции и называемых **элементами цепи**. Основными элементами цепи являются источники и приемники электрической энергии (сигналов). Электротехнические устройства, производящие электрическую энергию, называются **генераторами** или **источниками электрической энергии**, а устройства, потребляющие ее – **приемниками** (потребителями) электрической энергии.

У каждого элемента цепи можно выделить определенное число зажимов (**полюсов**), с помощью которых он соединяется с другими элементами. Различают **двух- и многополюсные** элементы. Двухполюсники имеют два зажима. К ним относятся источники энергии (за исключением управляемых и многофазных), резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы. Многополюсные элементы – это, например, триоды, трансформаторы, усилители и т.д.

Все элементы электрической цепи условно можно разделить на **неактивные** и **пассивные**. Активным называется элемент, содержащий в своей структуре источник электрической энергии. К пассивным относятся элементы, в которых рассеивается (резисторы) или накапливается (катушка индуктивности и конденсаторы) энергия. К основным характеристикам элементов цепи относятся их вольт-амперные, вебер-амперные и кулон-вольтные характеристики, описываемые дифференциальными или (и) алгебраическими уравнениями. Если элементы описываются линейными дифференциальными или алгебраическими уравнениями, то они называются **линейными**, в противном случае они относятся к классу **нелинейных**. Строго говоря, все элементы являются нелинейными. Возможность рассмотрения их как линейных, что существенно упрощает математическое описание и анализ процессов, определяется границами изменения характеризующих их переменных и их частот. Коэффициенты, связывающие переменные, их производные и интегралы в этих уравнениях, называются **параметрами** элемента.

Если параметры элемента не являются функциями пространственных координат, определяющих его геометрические размеры, то он называется **элементом с сосредоточенными параметрами**. Если элемент описывается уравнениями, в которые входят пространственные переменные, то он относится к классу **элементов с распределенными параметрами**. Классическим примером последних является линия передачи электроэнергии (длинная линия).

Цепи, содержащие только линейные элементы, называются линейными. Наличие в схеме хотя бы одного нелинейного элемента относит ее к классу нелинейных.

Рассмотрим пассивные элементы цепи, их основные характеристики и параметры.

1. Резистивный элемент (резистор)

Условное графическое изображение резистора приведено на рис. 1,а. Резистор – это пассивный элемент, характеризующийся резистивным сопротивлением. Последнее определяется геометрическими размерами тела и свойствами материала: удельным сопротивлением ρ (Ом м) или обратной величиной – удельной проводимостью $\gamma = \rho^{-1}$ (См/м).

В простейшем случае проводника длиной ℓ и сечением S его сопротивление определяется выражением .

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S}$$

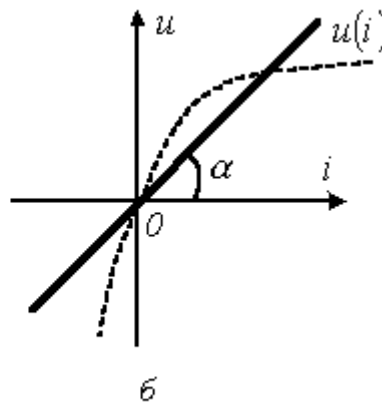
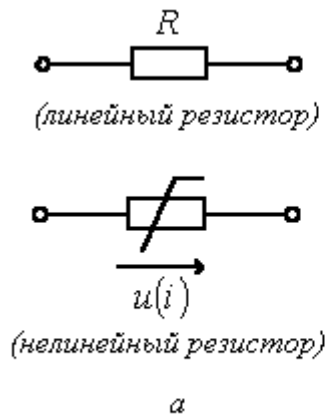


Рис.1

В общем случае определение сопротивления связано с расчетом поля в проводящей среде, разделяющей два электрода.

Основной характеристикой резистивного элемента является зависимость $u(i)$ (или $i(u)$), называемая вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Если зависимость $u(i)$ представляет собой прямую линию, проходящую через

начало координат (см.рис. 1,б), то резистор называется линейным и описывается соотношением

$$u = Ri = m_R i \operatorname{tg} \alpha$$

или

$$i = gu,$$

где $g = R^{-1}$ – проводимость. При этом $R = \text{const}$.

Нелинейный резистивный элемент, ВАХ которого нелинейна (рис. 1,б), как будет показано в блоке лекций, посвященных нелинейным цепям, характеризуется несколькими параметрами. В частности безынерционному резистору ставятся в соответствие

статическое $R_{cm} = \frac{U}{I}$ и дифференциальное $R_d = \left. \frac{du}{di} \right|_I$ сопротивления.

2. Индуктивный элемент (катушка индуктивности)

Условное графическое изображение катушки индуктивности приведено на рис. 2,а. Катушка – это пассивный элемент, характеризующийся индуктивностью. Для расчета индуктивности катушки необходимо рассчитать созданное ею магнитное поле.

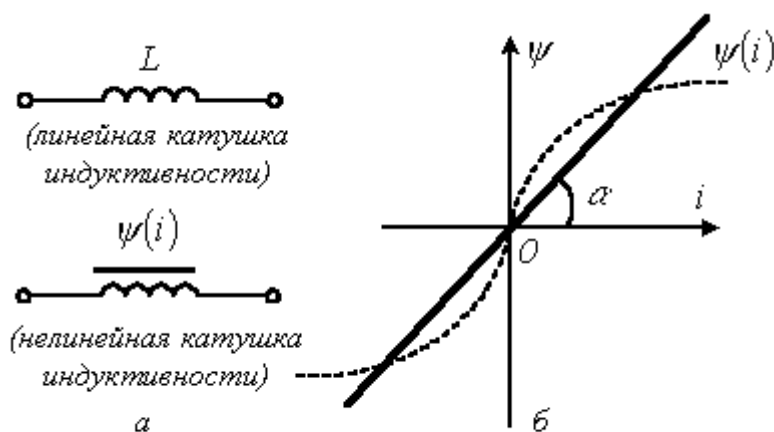


Рис.2

Индуктивность определяется отношением потокосцепления к току, протекающему по виткам катушки,

$$L = \frac{\Psi}{i}.$$

В свою очередь потокосцепление равно сумме произведений потока, пронизывающего

$$\Phi_k = \int_{S_k} \vec{B} d\vec{S}$$

витки, на число этих витков $\Psi = \sum W_k \Phi_k$, где

Основной характеристикой катушки индуктивности является зависимость $\psi(i)$, называемая вебер-амперной характеристикой. Для линейных катушек индуктивности зависимость $\psi(i)$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (см. рис. 2,б); при этом

$$L = m_L \operatorname{tg} \alpha = \text{const}.$$

Нелинейные свойства катушки индуктивности (см. кривую $\psi(i)$ на рис. 2,б) определяет наличие у нее сердечника из ферромагнитного материала, для которого зависимость $B(H) = \mu_0 \mu H$ магнитной индукции от напряженности поля нелинейна. Без учета явления

магнитного гистерезиса нелинейная катушка характеризуется статической $L_{cm} = \frac{\Psi}{I}$ и

$$L_d = \left. \frac{d\Psi}{di} \right|_I \text{ индуктивностями.}$$

дифференциальной

3. Емкостный элемент (конденсатор)

Условное графическое изображение конденсатора приведено на рис. 3,а.

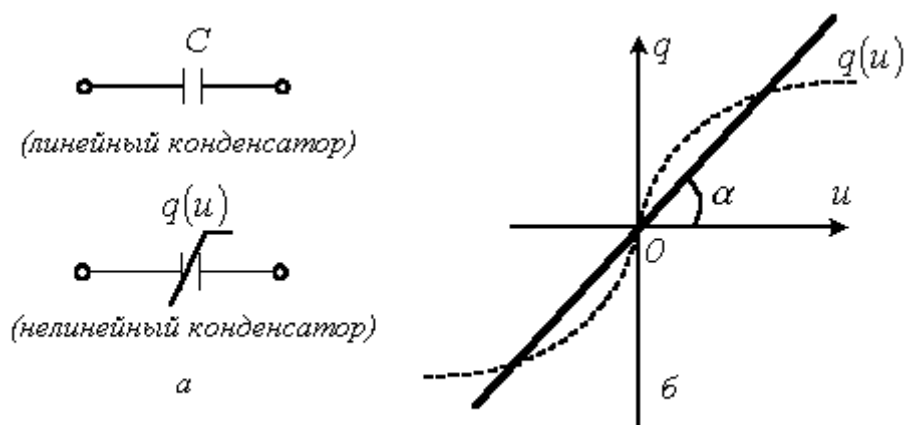


Рис.3

Конденсатор – это пассивный элемент, характеризующийся емкостью. Для расчета последней необходимо рассчитать электрическое поле в конденсаторе. Емкость определяется отношением заряда q на обкладках конденсатора к напряжению u между ними

$$C = \frac{q}{u} (\Phi)$$

и зависит от геометрии обкладок и свойств диэлектрика, находящегося между ними. Большинство диэлектриков, используемых на практике, линейны, т.е. у них относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \text{const}$. В этом случае зависимость $q(u)$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат, (см. рис. 3,б) и

$$C = m \operatorname{ctg} \alpha = \text{const}.$$

У нелинейных диэлектриков (сегнетоэлектриков) диэлектрическая проницаемость является функцией напряженности поля, что обуславливает нелинейность зависимости $q(u)$ (рис. 3,б). В этом случае без учета явления электрического гистерезиса нелинейный конденсатор

характеризуется статической $C_{ст} = \frac{q}{U}$ и дифференциальной $C_d = \left. \frac{dq}{du} \right|_U$ емкостями.

Схемы замещения источников электрической энергии

Свойства источника электрической энергии описываются ВАХ $U(I)$, называемой **внешней характеристикой источника**. Далее в этом разделе для упрощения анализа и математического описания будут рассматриваться источники постоянного напряжения (тока). Однако все полученные при этом закономерности, понятия и эквивалентные схемы в полной мере распространяются на источники переменного тока. ВАХ источника может быть определена экспериментально на основе схемы, представленной на рис. 4,а. Здесь вольтметр V измеряет напряжение на зажимах 1-2 источника И, а амперметр A – потребляемый от него ток I , величина которого может изменяться с помощью переменного нагрузочного резистора (реостата) R_H .

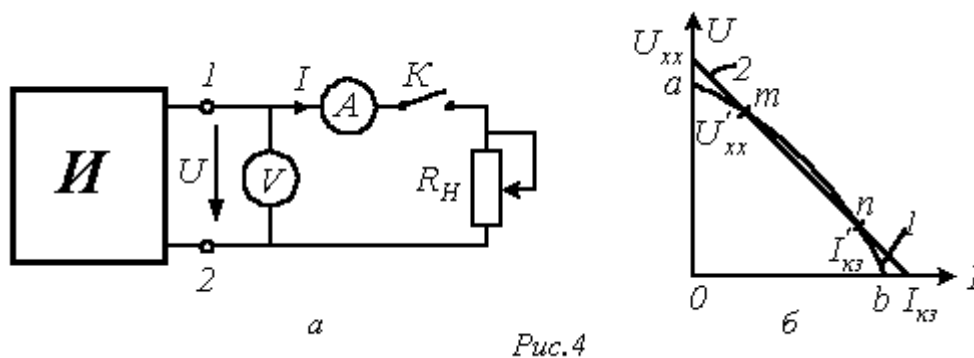


Рис.4

В общем случае ВАХ источника является нелинейной (кривая 1 на рис. 4,б). Она имеет две характерные точки, которые соответствуют:

а – режиму холостого хода $(I = 0; U = U'_{xx})$;

б – режиму короткого замыкания $(U = 0; I = I'_{кз})$.

Для большинства источников режим короткого замыкания (иногда холостого хода) является недопустимым. Токи и напряжения источника обычно могут изменяться в определенных пределах, ограниченных сверху значениями, соответствующими **номинальному режиму** (режиму, при котором изготовитель гарантирует наилучшие условия его эксплуатации в отношении экономичности и долговечности срока службы). Это позволяет в ряде случаев для упрощения расчетов аппроксимировать нелинейную ВАХ на рабочем участке m-n (см. рис. 4,б) прямой, положение которой определяется рабочими интервалами изменения напряжения и тока. Следует отметить, что многие источники (гальванические элементы, аккумуляторы) имеют линейные ВАХ.

Прямая 2 на рис. 4,б описывается линейным уравнением

$$U = U_{xx} - R_{вн} I, \quad (1)$$

где U_{xx} - напряжение на зажимах источника при отключенной нагрузке (разомкнутом ключе К в схеме на рис. 4,а); $R_{вн} = U_{xx} / I'_{кз}$ - **внутреннее сопротивление источника**.

Уравнение (1) позволяет составить **последовательную схему замещения** источника (см. рис. 5,а). На этой схеме символом Е обозначен элемент, называемый **идеальным источником ЭДС**.

Напряжение на зажимах этого элемента $U_{xx} = E = const$ не зависит от тока источника, следовательно, ему соответствует ВАХ на рис. 5,б. На основании (1) у такого источника $R_{вн} = 0$. Отметим, что направления ЭДС и напряжения на зажимах источника противоположны.

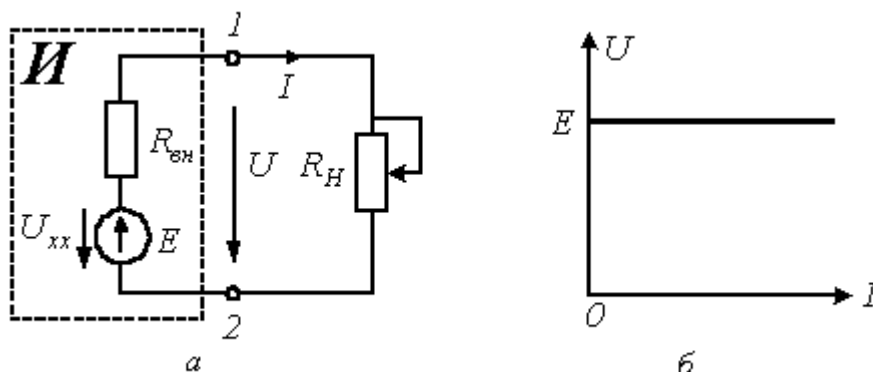


Рис.5

Если ВАХ источника линейна, то для определения **параметров его схемы замещения** необходимо провести замеры напряжения и тока для двух любых режимов его работы. Существует также параллельная схема замещения источника. Для ее описания разделим левую и правую части соотношения (1) на $R_{\text{вн}}$. В результате получим

$$I = \frac{U_{\text{хх}}}{R_{\text{вн}}} - \frac{U}{R_{\text{вн}}} = I_{\text{кз}} - \frac{U}{R_{\text{вн}}}$$

или

$$I = J - g_{\text{вн}} U, \quad (2)$$

где $J = I_{\text{кз}}$; $g_{\text{вн}} = R_{\text{вн}}^{-1}$ - **внутренняя проводимость источника**.

Уравнению (2) соответствует схема замещения источника на рис. 6,а.

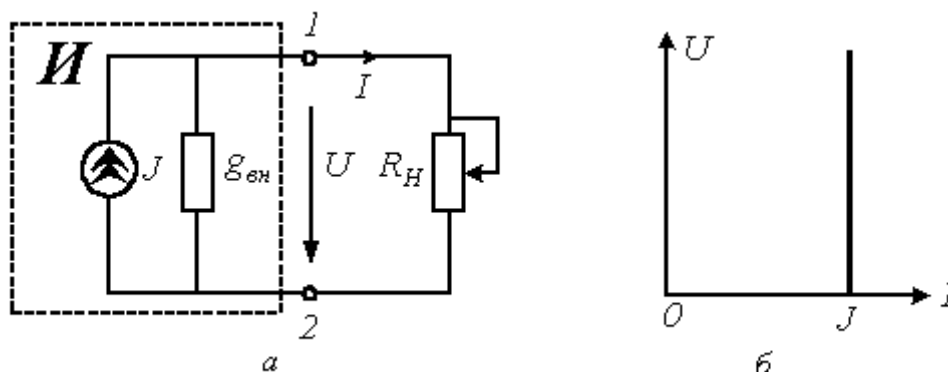


Рис.6

На этой схеме символом J обозначен элемент, называемый **идеальным источником тока**.

Ток в ветви с этим элементом равен $J = I_{\text{кз}}$ и не зависит от напряжения на зажимах источника, следовательно, ему соответствует ВАХ на рис. 6,б. На этом основании с учетом (2) у такого источника $g_{\text{вн}} = 0$, т.е. его внутреннее сопротивление $R_{\text{вн}} = \infty$.

Отметим, что в расчетном плане при выполнении условия $E = JR_{\text{вн}}$ последовательная и параллельная схемы замещения источника являются эквивалентными. Однако в энергетическом отношении они различны, поскольку в режиме холостого хода для последовательной схемы замещения мощность равна нулю, а для параллельной – нет.

Кроме отмеченных режимов функционирования источника, на практике важное значение имеет **согласованный режим** работы, при котором нагрузкой R_H от источника потребляется максимальная мощность

$$P_{\text{max}} = \frac{U_{\text{хх}}^2}{4R_{\text{вн}}}, \quad (3)$$

Условие такого режима

$$R_H = R_{\text{вн}}, \quad (4)$$

В заключение отметим, что в соответствии с ВАХ на рис. 5,б и 6,б идеальные источники ЭДС и тока являются источниками бесконечно большой мощности.

2.Порядок выполнения работы:

1. Изучить главу «Описание оборудования».
2. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
3. Убедиться, что все выключатели модулей находятся в положении «ВЫКЛ»

4. По указанию преподавателя, выбрать модули для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки.

5. Подключить защитное заземление "С".

6. Подключить модули к сети -220В 50Гц.

7. Соединить модули согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.

8. Провести эксперимент.

9. Отключить модули от сети -220В 50Гц.

10. Составить отчет по лабораторной работе.

3. Порядок проведения эксперимента:

В работе используются модули: «Источник питания», «Измеритель мощности», «Соппротивления добавочные», «Мультиметры», «Миллиамперметры».

3.1. Изучение паспортных характеристик стрелочных измерительных приборов. Для этого внимательно рассмотреть лицевые панели стрелочных амперметров модуля «Миллиамперметры», обратить внимание на построение измерительной шкалы, условные знаки и заполнить табл. 3.1.

Таблица 3.1

Характеристика стрелочного электроизмерительного прибора				
Тип прибора	РА1	РА2	РА3	РА4
Система измерительного механизма				
Предел измерения (номинальное значение)				
Цена деления				
Минимальное значение измеряемой величины				
Класс точности				
Допустимая максимальная абсолютная погрешность				
Род тока				
Нормальное положение шкалы				
Допустимые параметры окружающей среды				
Прочие характеристики				

3.2. Построить график зависимости относительной погрешности измерения от измеряемой величины $\gamma = f(A_{изм})$ прибора, указанного преподавателем. Сделать вывод о величине относительной погрешности измерения в начальной и конечной части шкалы, о характере изменения погрешности вдоль шкалы прибора. Для построения кривой взять 5-6 точек. Последняя расчетная точка должна соответствовать номинальному (предельному) значению измеряемой величины.

3.3. Ознакомиться с лицевой панелью мультиметра модуля «Мультиметры» и зарисовать её.

3.4. Подготовить мультиметр для измерения постоянного напряжения. Включить электропитание модулей «Мультиметры» и «Источник питания» (перевести в положение «Вкл.» выключатель питания). Измерить значения выходных напряжений источника регулируемого напряжения Е1 в соответствии с данными таблицы 3.2. Выключить электропитание модулей «Мультиметры» и «Источник питания».

Таблица 3.2

Показания E1	+5V	+9V	+12V	~12V
Измерение				

3.5. Подготовить мультиметр для измерения переменного напряжения. Включить электропитание модулей «Мультиметры» и «Источник питания». Мультиметром измерить значение источника переменного напряжения E2 ~12V. Данные занести в таблицу 3.2. Выключить электропитание модулей «Мультиметры» и «Источник питания».

3.6. Подготовить мультиметр для измерения сопротивлений резисторов модуля «Сопротивления добавочные». Результаты занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Резистор	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Номинальное значение сопротивления, Ом	5	10	20	30	50	70
Измерено, Ом						

3.7. Изучение цифрового универсального измерителя мощности. Ознакомится с цифровым универсальным измерителем мощности (ваттметром) модуля «Измеритель мощности». Подготовить ваттметр для проведения измерений. Для этого собрать электрическую схему по рис. 3.1.

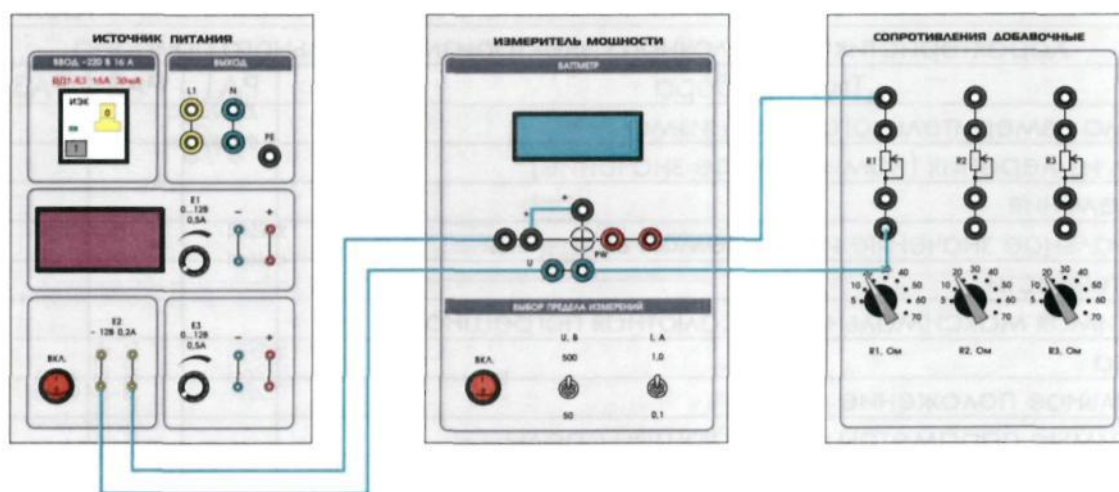


Рис. 3.1. Изучение цифрового универсального измерителя мощности.

3.8. Установить предел измерения напряжения прибора «50 В», предел измерения тока «1 А», а также заданное преподавателем значение сопротивления резистора R1 модуля «Сопротивления добавочные». После проверки схемы преподавателем включить электропитание модулей «Измеритель мощности» и «Источник питания» (перевести в положение «Вкл.» выключатель питания). Измерить напряжение, ток, активную мощность и частоту напряжения питания. Данные занести в табл. 3.4. Выключить электропитание

модулей «Измеритель мощности» и «Источник питания» (перевести в положение «Выкл.» выключатель питания).

Таблица 3.4

U, В	I, А	P, Вт	f, Гц

Контрольные вопросы

1. Что такое предел измерения?
2. Как определяется цена деления прибора?
3. Что такое абсолютная и относительная погрешности измерения?
4. Что характеризует класс точности прибора?
5. В какой части шкалы измерения точнее и почему?
6. Классификация элементов электрической цепи.
7. Резистивный элемент.
8. Индуктивный элемент.
9. Емкостный элемент.
10. Схемы замещения источников электрической энергии.

Лабораторная работа №2 «Линейные электрические цепи постоянного тока»

Цель работы: получение навыков сборки простых электрических цепей, включения в электрическую цепь измерительных приборов. Научиться измерять токи и напряжения, убедиться в соблюдении законов Ома и Кирхгофа в линейной электрической цепи. Исследовать влияние изменения параметров одного потребителя на режим работы других потребителей при последовательном, параллельном и смешанном соединении.

1.Краткие теоретические сведения.

Цепи постоянного тока являются важной частью электрооборудования химических производств. Например, постоянный ток широко применяется для питания ванн гальванического покрытия, зарядных устройств для аккумуляторов, двигателей постоянного тока, устройств сигнализации и связи.

Под постоянным током понимают электрический ток, не изменяющийся во времени.

Электрической цепью называется связанная совокупность источников электроэнергии, ее потребителей и соединительных проводов.

Отдельное устройство, входящее в состав электрической цепи и выполняющее в ней определенную функцию, называется элементом электрической цепи. Основными элементами являются источники и приемники электроэнергии, соединительные провода, измерительные приборы, коммутационная и защитная аппаратура.

В источниках электроэнергии различные виды энергии, например, химическая (гальванические элементы), механическая (электромеханические генераторы), тепловая (термопары), световая (солнечные батареи) преобразуются в электрическую. Важнейшим параметром источника электроэнергии является его электродвижущая сила ЭДС (E).

В приемниках электрической энергии происходит обратное преобразование - электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии, например, в химическую, механическую, тепловую, световую.

Электрические цепи классифицируются по нескольким признакам.

По виду тока делят на цепи постоянного и переменного тока.

По характеру параметров переменных цепи разделяют на линейные и нелинейные. К линейным относят цепи, у которых электрическое сопротивление R каждого участка не зависит от значений и направлений тока и напряжения.

Классификация цепей по сложности. Цепи бывают простые и сложные. К простым относят те цепи, все элементы которых соединены последовательно. Во всех элементах протекает один и тот же ток. К сложным цепям относят цепи с разветвлениями. Различают разветвленные цепи с одним источником энергии и с несколькими источниками.

Ветвь электрической цепи - участок, элементы которого соединены последовательно. Ток в элементах один и тот же.

Узел электрической цепи - точка соединения не менее чем 3-х ветвей.

Контур - любой путь вдоль ветвей электрической цепи, начинающийся и заканчивающийся в одной и той же точке.

Двухполюсник - часть электрической цепи с двумя выделенными выводами.

Четырехполюсник - часть электрической цепи, имеющая четыре внешних вывода (две пары).

Участки электрической цепи делятся на пассивные и активные. Участок электрической цепи, содержащий источник электрической энергии, называется активным, не содержащий - пассивным.

Величина, характеризующая противодействие проводящей среды движению электрических зарядов, т.е. току, называется электрическим сопротивлением R . Элемент

электрической цепи, параметром которого является его электрическое сопротивление R , называется резистором. Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью G .

Закон Ома. Для пассивных участков электрической цепи закон Ома имеет вид:

$$I = \frac{U}{R}. (1)$$

Напряжение на пассивном участке цепи U и равное ему произведение IR часто называют падением напряжения.

Внутреннее сопротивление источника. У реального источника энергии два параметра: ЭДС E и внутреннее сопротивление R_0 , которое на схемах замещения показывается отдельным элементом. Если источник не подключен к внешней цепи, то напряжение на его выводах численно равно ЭДС (напряжение холостого хода). Напряжение U на выводах нагруженного источника меньше ЭДС

$$U = E - R_0 I. (2)$$

Источник, внутренним сопротивлением которого можно пренебречь, называется идеальным источником ЭДС.

Методы расчета электрических цепей

Для расчета электрических цепей разработаны различные приемы. Наибольшее применение находят следующие методы:

- метод упрощения;
- метод непосредственного применения законов Кирхгофа;
- метод контурных токов;
- метод наложения.

Метод упрощения используется обычно для анализа цепей с одним источником энергии. Метод состоит в том, что участки электрической цепи заменяются более простыми по структуре, при этом токи и напряжения в непреобразованной части цепи не должны изменяться. В результате цепь “свертывается” до простейшего вида. При этом необходимо уметь преобразовывать последовательно и параллельно соединенные резистивные элементы.

Последовательное соединение резистивных элементов.

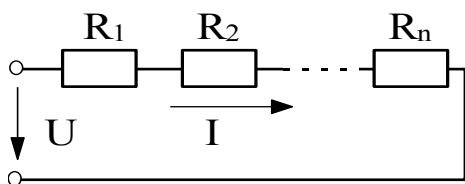


Рис.1. Последовательное соединение элементов

Ток во всех последовательно соединенных элементах один и тот же. Для схемы на рис. 1 можно записать $U = (R_1 + R_2 + \dots + R_n)I = R_3 I$, (3) где R_3 - сопротивление, эквивалентное соединенным последовательно. Как видно из формулы, оно определяется как сумма всех последовательно включенных сопротивлений.

Параллельное соединение резистивных элементов. В данной схеме (рис. 2) ко всем элементам приложено

одно и то же напряжение U . На основании первого закона Кирхгофа можно записать:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (4)$$

или, учитывая, что для каждой ветви по закону Ома $I_k = U \frac{1}{R_k}$,

$$I = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right). \quad (5)$$

Вводя понятие проводимости, получим

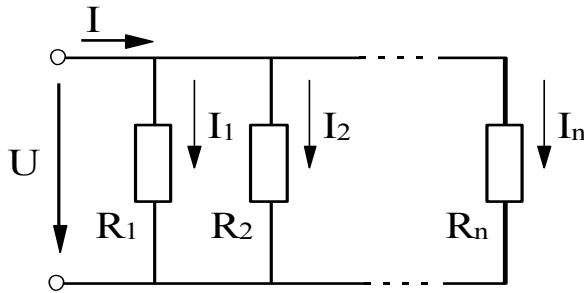


Рис.2. Параллельное соединение элементов

$$I = U(G_1 + G_2 + \dots + G_n) = UG_{\Sigma}. \quad (6)$$

Таким образом, эквивалентная проводимость G_{Σ} параллельно включенных резистивных элементов равна сумме их проводимостей. В частном случае, если параллельно соединены два резистора, их эквивалентное сопротивление

$$R_{\Sigma} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (7)$$

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа является наиболее общим приемом, используемым для анализа сложных электрических цепей.

Первый закон Кирхгофа применяется к узлам электрической цепи. Он гласит, что алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю, т.е.

$$\sum_{k=0}^n I_k = 0. \quad (8)$$

Второй закон Кирхгофа применяется к контурам электрической цепи. Он гласит, что алгебраическая сумма напряжений в контуре электрической цепи равна нулю или алгебраическая сумма падений напряжения на сопротивлениях данного контура равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре:

$$\sum_{k=0}^n E_k = \sum_{k=0}^m I_k R_k. \quad (9)$$

Для заданной электрической цепи составляется система линейных алгебраических уравнений первого порядка относительно неизвестных токов. Уравнения составляются по обоим законам. По первому закону - для независимых узлов, по второму - для независимых контуров. Общее число уравнений равно числу неизвестных токов в цепи.

Метод контурных токов является наиболее распространенным методом анализа сложных электрических цепей. В основе его лежат законы Кирхгофа. Метод предполагает, что в каждом независимом контуре протекает собственный *контурный ток*, а ток каждой ветви равен алгебраической сумме контурных токов, замыкающихся через эту ветвь.

Метод наложения базируется на принципе суперпозиции, применимом для линейных физических систем. Применительно к линейным электрическим цепям он формулируется следующим образом: *ток в любой ветви сложной электрической цепи, содержащей несколько ЭДС, равен алгебраической сумме токов от действия каждой из ЭДС в отдельности.*

В соответствии с этим принципом расчет сложной цепи сводится к нескольким (по числу источников ЭДС) вариантам расчета схемы, в которой оставлен только один источник ЭДС.

Потенциальной диаграммой называется график зависимости потенциала от сопротивления, построенный при обходе контура.

2. Порядок выполнения работы:

1. Изучить главу «Описание оборудования».
2. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
3. Убедиться, что все выключатели модулей находятся в положении «ВЫКЛ»
4. По указанию преподавателя, выбрать модули для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки.
5. Подключить защитное заземление "©".
6. Подключить модули к сети ~220В 50Гц.
7. Соединить модули согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.
8. Провести эксперимент.
9. Отключить модули от сети ~220В 50Гц.
10. Составить отчет по лабораторной работе.

3. Порядок проведения эксперимента:

В работе используются: модули: «Источник питания», «Измеритель мощности», «Сопротивления добавочные», «Мультиметры», «Миллиамперметры», «Измерительные приборы».

3.1. Пользуясь схемами соединений (рис. 3.1, 3.2, 3.3), начертить принципиальные схемы исследуемых цепей с включенными измерительными приборами.

3.2. Собрать линейную электрическую цепь постоянного тока с последовательным соединением элементов (рис.3.1). Установить в соответствии номером варианта (табл.3.1) величины номинальных сопротивлений резисторов R1-R3. На измерителе мощности (ваттметре) установить пределы измерений «50 В» и «1 А». Представить схему для проверки преподавателю.

Таблица 3.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
R1, Ом	5	10	20	5	5	10	10	5
R2, Ом	10	5	5	5	5	10	10	20
	5	10	10	10	10	5	5	10
R3, Ом	5	5	5	10	20	5	10	5

3.3. Включить электропитание модулей (перевести в положение «ВКЛ» выключатели питания). Измерить ток в цепи, величину напряжения на входе цепи и напряжения на резисторах R1, R2 и R3 (с помощью мультиметров). Результаты измерений занести в табл.3.2. Изменить величину сопротивления R2 и снова провести аналогичные измерения. Выключить питание модулей. По результатам измерений вычислить сопротивление каждого потребителя (R1, R2, R3) и общее (эквивалентное) сопротивление R_э цепи. Результаты вычислений занести в табл. 3.2.

3.4. Сравнить результаты измерений и убедиться в том, что сумма сопротивлений отдельных потребителей равна сопротивлению всей цепи. Убедиться в соблюдении второго закона Кирхгофа. Объяснить изменение режима работы цепи и отдельных потребителей при изменении величины сопротивления одного из резисторов.

Таблица 3.2

Измерено					Вычислено			
Напряжение на входе цепи $U, В$	Ток в цепи, $I, А$	Напряжение на потребителях, В			Сопротивление потребителей, Ом			Эквивалентное сопротивление цепи, $R_{\Sigma}, Ом$
		U_1	U_2	U_3	R_1	R_2	R_3	

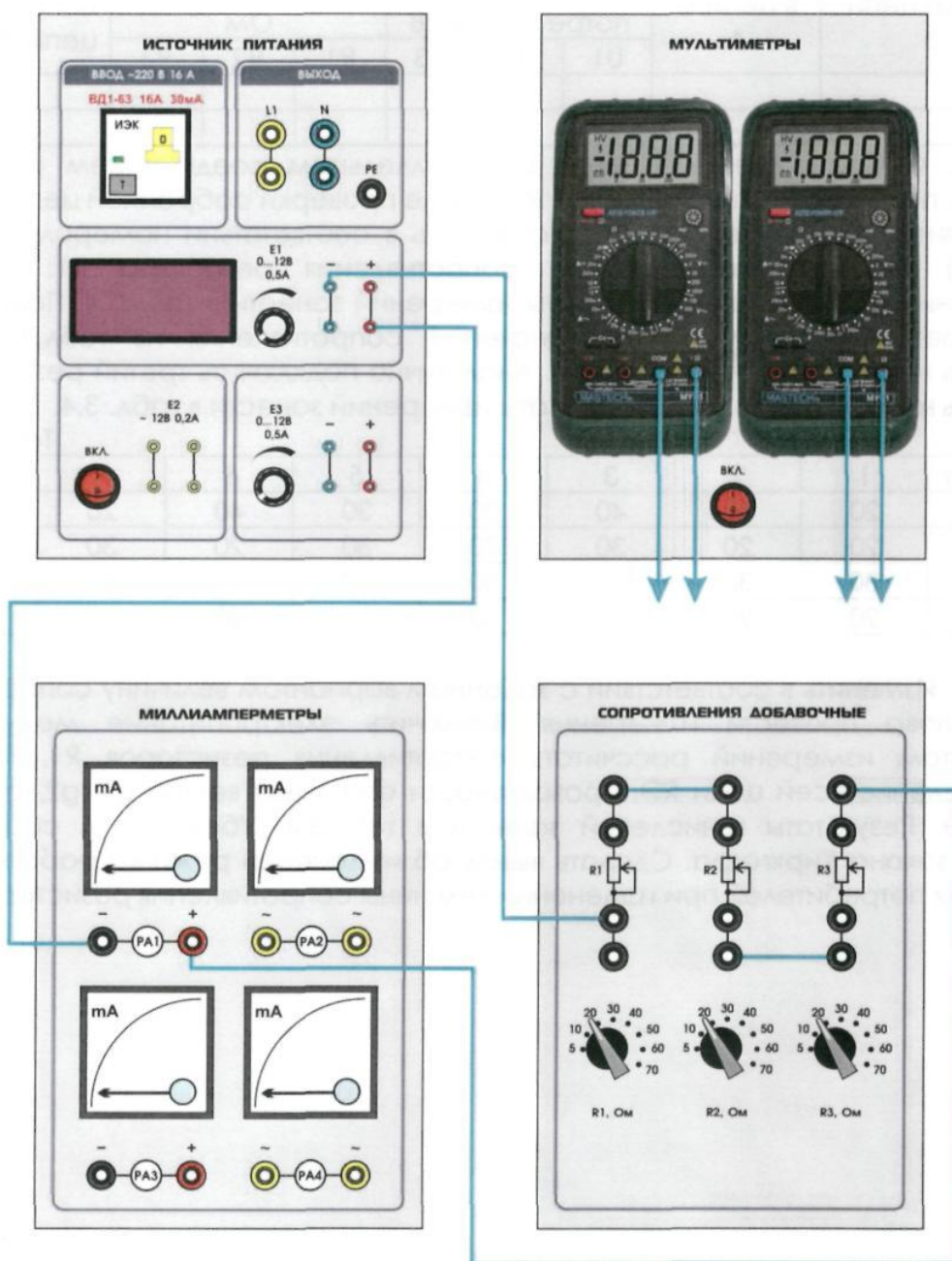


Рис.3.1. Изучение линейной электрической цепи постоянного тока с последовательным соединением элементов.

3.5. Собрать линейную цепь с параллельным соединением резисторов (рис.3.2), подключив только резистор R1. После проверки собранной цепи включить электропитание модулей стенда. Установить в соответствии номером варианта (табл.3.3) величину номинального сопротивления резистора R1. Измерить напряжение и токи в цепи. Результаты измерений занести в табл.3.4. Подключить в схему резистор R2, установить значение сопротивления из табл.3.3, снова измерить напряжение и токи в цепи. Аналогично подключить третий резистор R3 и измерить напряжение и токи. Результаты измерений занести в табл.3.4.

Таблица 3.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
R1, Ом	20	30	40	20	30	40	20	30
R2, Ом	20	20	30	20	30	20	30	30
	30	30	20	30	20	30	40	40
R3, Ом	20	20	30	30	30	20	20	20

3.6. Изменить в соответствии с заданным вариантом величину сопротивления R2 и снова провести измерения. Выключить электропитание модулей. По результатам измерений рассчитать сопротивления резисторов R1, R2, R3 и сопротивление всей цепи R_э, проводимости отдельных ветвей g1, g2, g3 и всей цепи g_э. Результаты вычислений занести в табл.3.4. Убедиться в соблюдении первого закона Кирхгофа. Сделать вывод об изменении режима работы цепи и отдельных потребителей при изменении величины сопротивления резистора R2.

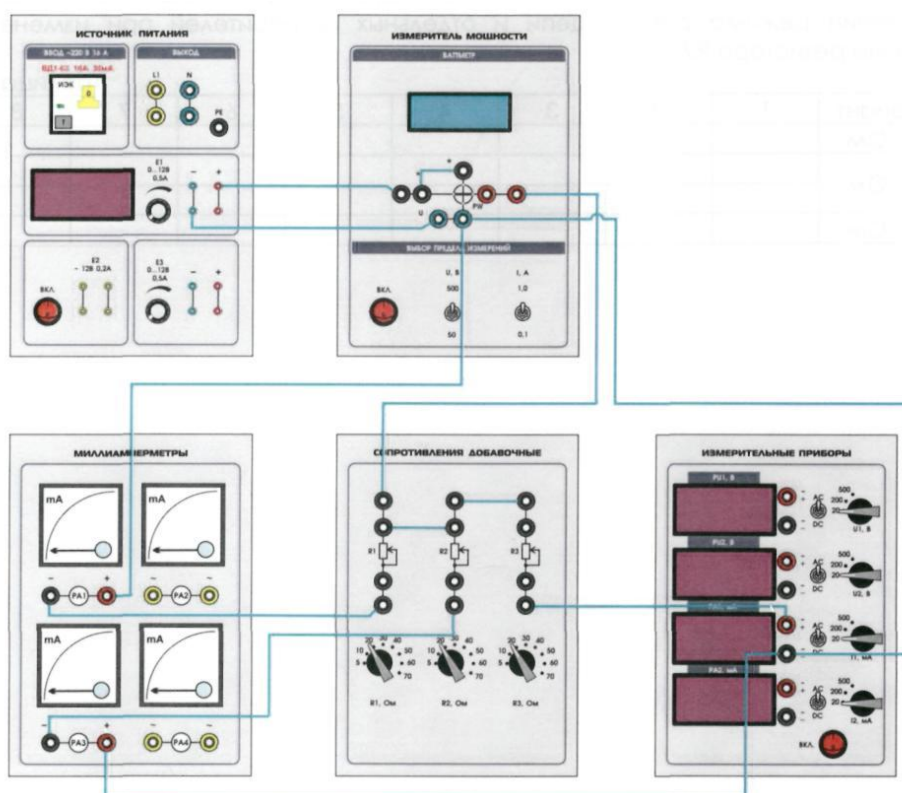


Рис. 3.2. Изучение линейной электрической цепи постоянного тока с параллельным соединением элементов.

Таблица 3.4

Измерено					Вычислено							
U, В	I, А	I ₁ , А	I ₂ , А	I ₃ , А	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	g ₁ См	g ₂ См	g ₃ , См	R _э . Ом	g _э , См
			—	—								
				—								

3.7. Собрать линейную цепь со смешанным соединением резисторов (рис.3.3). Установить значения номинальных сопротивлений резисторов R₁-R₃ модуля «Сопротивления добавочные 1» в соответствии с заданным вариантом (табл.3.5). После проверки схемы преподавателем включить электропитание модулей стенда. Измерить напряжения на входе цепи и на всех участках цепи, а также все токи. Результаты занести в табл.3.6. Установить новое значение резистора R₂ (табл.3.5) и снова измерить напряжения и токи в цепи. Выключить электропитание модулей. По результатам измерений вычислить мощность каждого участка цепи P₁, P₂, P₃ и всей цепи P. Определить эквивалентное сопротивление цепи R_э. Результаты вычислений занести в табл.3.6. Проверить выполнение баланса мощностей в исследуемой цепи. Сделать вывод об изменении режима работы цепи и отдельных потребителей при изменении величины резистора R₂.

Таблица 3.5

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
R ₁ , Ом								
R ₂ , Ом								
R ₃ , Ом								

Таблица 3.6

Измерено						Вычислено				
U, В	U ₁₂ , В	U ₃ , В	I ₁ , А	I ₂ , А	I ₃ , А	P ₁ , Вт	P ₂ , Вт	P ₃ , Вт	P, Вт	R _э , Ом

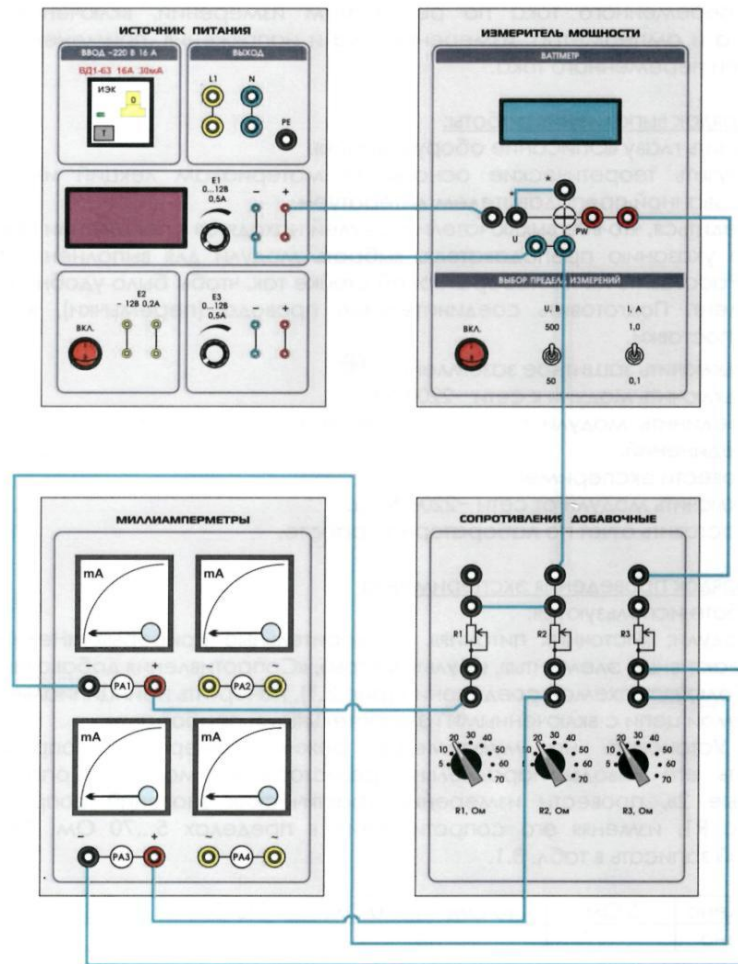


Рис.3.3. Изучение линейной электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением элементов.

Контрольные вопросы

1. Как с помощью амперметра определить направление тока в цепи?
2. Запишите уравнение закона Ома для цепи с учетом внутреннего сопротивления источника энергии.
3. Запишите уравнение закона Ома для участка цепи без ЭДС.
4. Что такое узел, ветвь, контур?
5. Как записываются законы Кирхгофа?
6. В чем состоит метод наложения?
7. Запишите уравнение второго закона Кирхгофа для заданного контура цепи (рис. 3).
8. Как рассчитать эквивалентное сопротивление цепи?
9. Сколько уравнений 1-го и 2-го законов Кирхгофа входит в систему уравнений для расчета сложной цепи?
10. Как определить истинные токи по известным контурным токам?

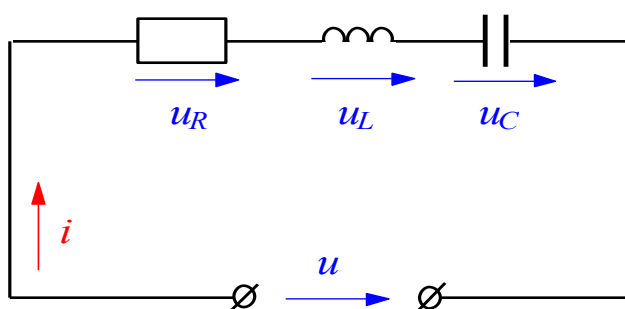
Лабораторная работа №3 «Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением элементов»

Цель работы: приобретение навыков сборки простых электрических цепей, измерение напряжений на отдельных участках цепи, изучение свойств цепей при последовательном соединении активных и реактивных элементов, знакомство с явлением резонанса напряжений, построение векторных диаграмм.

1. Краткие теоретические сведения.

Треугольник напряжений

Цепь, в любом сечении которой протекает один и тот же ток, называется последовательной.



Если ток в линейной цепи меняется по гармоническому закону $i = I_m \sin \omega t$, то по гармоническому закону будут меняться напряжения на участках цепи.

Тогда на основании второго закона Кирхгофа **мгновенное значение напряжения u на зажимах цепи в любой момент времени будет равно сумме мгновенных значений напряжений на отдельных участках цепи, т.е.**

Рис. 1. Последовательное соединение элементов

$$u = u_R + u_L + u_C, \quad (1)$$

$$\text{где } u_R = U_{mR} \sin \omega t, \quad u_L = U_{mL} \sin(\omega t + \pi/2), \quad u_C = U_{mC} \sin(\omega t - \pi/2), \quad (2)$$

где U_{mR}, U_{mL}, U_{mC} - амплитудные значения напряжений на активном, индуктивном и емкостном элементах цепи. Так как напряжения на отдельных участках цепи не совпадают по фазе, действующее значение напряжения, приложенного к зажимам цепи, может быть получено векторным сложением:

$$\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C. \quad (3)$$

На основании уравнений (2), (3) строится векторная диаграмма напряжений и тока. Построение векторной диаграммы начинается с вектора тока, на выбор начальной фазы которого не налагается каких-либо ограничений. В выбранном масштабе тока направим его горизонтально вправо. В выбранном масштабе напряжения строим соответствующие векторы напряжений из уравнения (3). Фазы векторов напряжений берутся в соответствии с уравнениями (2).

Синфазно с векторами тока откладывается вектор активной составляющей напряжения $\bar{U}_a = \bar{I}R = \bar{U}_R$. Вектор реактивной индуктивной составляющей напряжения $\bar{U}_L = \bar{I}X_L$ строится сдвинутым относительно вектора тока против направления движения часовой стрелки на угол $\pi/2$. Вектор реактивной емкостной составляющей напряжения $\bar{U}_C = \bar{I}X_C$ строится сдвинутым относительно вектора тока в направлении движения часовой стрелки на угол $-\pi/2$.

Вектор напряжения $\bar{U}$, подведенного на вход рассматриваемой цепи, находится сложением векторов $\bar{U}_R, \bar{U}_L, \bar{U}_C$ по правилам векторной алгебры (рис.2).

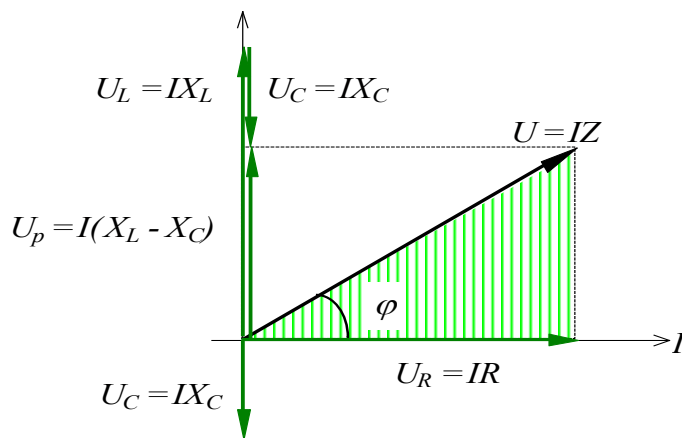


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений

Действующее значение этого напряжения можно определить из заштрихованного треугольника, который называется треугольником напряжений.

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}. \quad (4)$$

Подставляя в уравнение (4) выражение для составляющих напряжения, получим:

$$U = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (5)$$

где $\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = Z$ - полное сопротивление цепи.

Тогда
$$I = \frac{U}{Z}. \quad (6)$$

Выражение (6) является законом Ома для цепи с последовательным соединением элементов.

Из треугольника напряжений следует, что

$$U_a = U_R = U \cos \varphi, \quad U_p = U_L - U_C = U \sin \varphi. \quad (7)$$

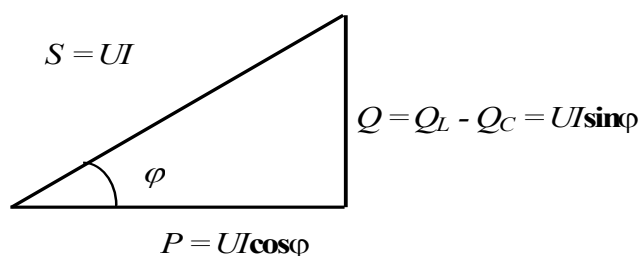
Величина угла сдвига фаз между током и напряжением определяется соотношением реактивных и активных сопротивлений цепи:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (8)$$

Виды мощности. Треугольник мощностей

В цепях переменного тока различают три понятия мощности: активная P , реактивная Q , полная S .

Соотношения между мощностями могут быть получены из треугольника мощностей, который образуется путем умножения всех сторон треугольника напряжений на значение тока I .



Здесь:

Q_L - реактивная индуктивная мощность,
 Q_C - реактивная емкостная мощность.

Рис.3. Треугольник мощностей

Активная мощность $P = UI \cos \varphi$ [Вт] - характеризует необратимый процесс преобразования электромагнитной энергии источника в другие виды энергии: механическую, тепловую, световую и т.д. Реактивная мощность $Q = UI \sin \varphi$ [Вар] (вольт-ампер реактивный) - характеризует обратимый процесс преобразования электромагнитной энергии источника в энергию магнитного поля катушки и энергию электрического поля конденсатора.

Полная мощность $S = UI$ [ВА] (вольт-ампер) - характеризует наибольшее значение активной мощности при заданных действующих значениях тока и напряжения.

Как видно из выражения активной мощности, если мощность, потребляемая приемником в данной цепи, является вполне определенной величиной, то при неизменном напряжении на зажимах цепи и с уменьшением $\cos \varphi$ ток нагрузки источника будет увеличиваться при одной и той же отдаваемой мощности.

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}. \quad (9)$$

Поэтому даже при полной загрузке током источника, но при низком $\cos \varphi$ источник по мощности будет недогружен. Значение $\cos \varphi$ характеризует использование полной или установленной мощности источника и называется коэффициентом мощности.

Наибольшего значения активная мощность достигает при $\cos \varphi = 1$, т.е. когда $\varphi = 0$, или, как следует из выражения (8), когда $X_L = X_C$. Такой режим работы называется резонансом напряжений. Явление резонанса напряжений как положительный эффект используется в технике слабых токов (в радиотехнике). В технике сильных токов резонанс напряжений является аварийным режимом, т.к. в этом случае напряжения на реактивных элементах могут достигать значений, намного превышающих приложенное напряжение, что может привести к пробое изоляции конденсаторов и катушек индуктивности.

Параметры цепи и характер нагрузки

Работа электрической цепи может быть описана по крайней мере тремя основными параметрами: напряжением (U), током (I) и активной мощностью (P). Произведение напряжения и тока в цепи дает нам полную мощность цепи ($S = UI$), а реактивную мощность (Q) можно найти из треугольника мощностей, зная полную и активную мощности.

Если активная мощность равна полной ($P = S$), то реактивная мощность обращается в ноль ($Q = 0$), тогда характер нагрузки является активным, а схема замещения цепи содержит только активное сопротивление.

Если активная мощность в цепи равна нулю ($P = 0$), то полная мощность равна реактивной ($Q = S$), тогда характер нагрузки становится реактивным: или индуктивным (если в цепи содержится реактивное индуктивное сопротивление), или емкостным (если в цепи содержится реактивное емкостное сопротивление), а схема замещения содержит или индуктивность, или емкость.

Если активная мощность имеет значение отличное от нуля, но при этом меньше полной ($0 < P < S$), то мы имеем случай, когда характер нагрузки смешанный. Какой конкретно характер нагрузки будет, - зависит от разницы между реактивными сопротивлениями $X_L - X_C$. Если разница положительная ($X_L > X_C$), то характер нагрузки активно-индуктивный, если отрицательна ($X_L < X_C$) - активно-емкостной.

Таким образом характер нагрузки может быть определен, если известна структура цепи. Это легко сделать для простых электрических цепей. Для более сложных электрических цепей, содержащих большое количество электротехнических устройств, обычно используют фазометр,

позволяющий определить угол сдвига фаз между напряжением и током и его характер: емкостной или индуктивный.

2.Порядок выполнения работы:

1. Изучить главу «Описание оборудования».
 2. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
 3. Убедиться, что все выключатели модулей находятся в положении «ВЫКЛ».
 4. По указанию преподавателя, выбрать модули для выполнения текущего задания.
- Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент
- Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки.

Подключить защитное заземление.

Подключить модули к сети ~220В 50Гц.

Соединить модули согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.

Провести эксперимент.

Отключить модули от сети ~220В 50Гц.

10. Составить отчет по лабораторной работе.

3.Порядок проведения эксперимента:

В работе используются модули: «Источник питания», «Измеритель мощности», «Нелинейные и реактивные элементы», «Мультиметры», «Сопротивления добавочные»;

3.1. Пользуясь схемой соединений (рис.3.1), начертить принципиальную схему исследуемой цепи с включенными измерительными приборами.

3.2. Собрать электрическую цепь (рис.3.1). Установить в соответствии с вариантом (табл.3.1) значения сопротивления резистора R1 и емкость конденсатора C.

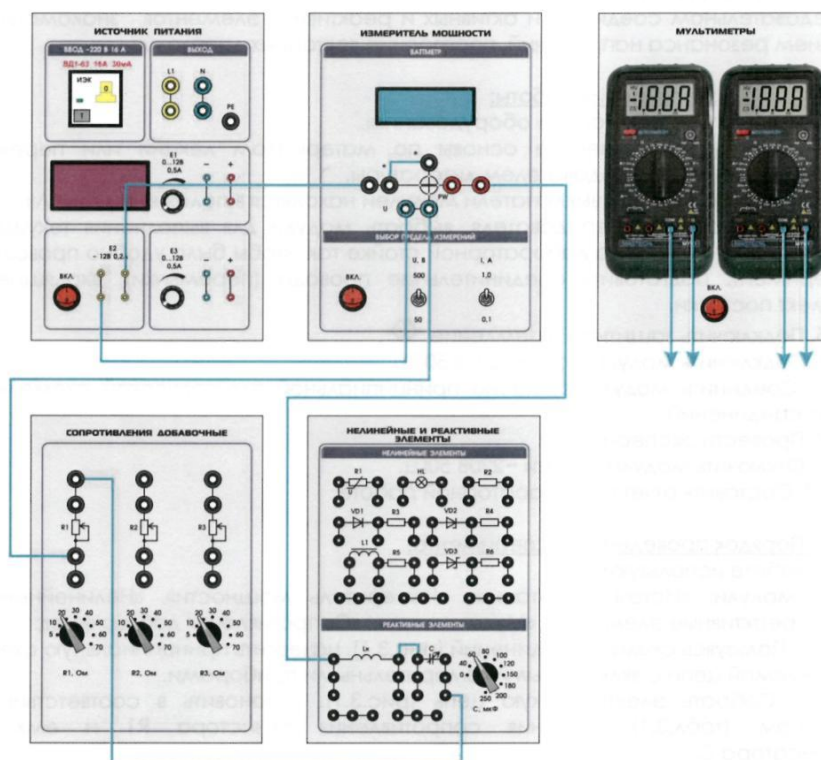


Рис.3.1. Исследование электрической цепи переменного тока с последовательным соединением элементов.

Таблица 3.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
R1, Ом								
C, мкФ	80	150	80	120	100	180	200	80

3.3. Подсоединить параллельно конденсатору С дополнительный проводник(исключив этим конденсатор из цепи). Предъявить схему для проверки преподавателю.

3.4. Включить питание модулей стенда и произвести измерения указанных в таблице 3.2. величин в цепи с последовательным соединением резистора R1 и катушки Lk. Перед измерением напряжения перевести мультиметр (P1 или P2 в режим измерения переменного напряжения«~»). Результаты измерений занести в табл.3.2.

3.5. Выключить электропитание модулей стенда, подсоединить параллельно катушке Lk дополнительный проводник(исключив этим катушку из цепи) . Предъявить схему для проверки преподавателю.

3.6. Включить электропитание модулей стенда и произвести измерения указанных в таблице 3.2. величин для цепи с последовательным соединением резистора R1 и конденсатора Xc. Результаты измерений занести в таблицу 3.2. Выключить электропитание модулей стенда убрать дополнительный проводник.

Таблица 3.2

Схема	Измерено						Вычислено	
	U, В	I, А	UR, В	Uk, В	Uc, В	P, Вт	Cosφ	
Z _к , R1								
R1,Xc								
<u>R1.LK.Xc1</u>								
R1,Lk, Xc2								
R1,L _к ,Xc3								

3.7. В цепи с последовательным соединением резистора R1, катушки конденсатора С изменяя величину емкости конденсатора С с помощью галетного переключателя модуля реактивных элементов, добиться наибольшего показания амперметра то есть обеспечить состояния цепи близкое к резонансу напряжений. Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

3.8. Уменьшая и увеличивая величину емкости конденсатора С(от резонансного значения) добиться существенного изменения величины тока и провести измерения указанных в таблице величин для двух новых состояний цепи.Результаты измерений занести в табл.3.2. Выключить электропитание модулей стенда.

3.9. Для цепи с последовательным соединением трех элементов (Rl, Lk, C) по результатам измерений определить полную мощность цепи S и отдельных участков Sr, Sk ,Sc - активные мощности резистора и катушки индуктивности Pr и Pк, а также полное Z, активное R и реактивное X сопротивления всей цепи. Результаты расчета занести в табл.3.3.

Таблица 3.3

S, ВА	S _R , ВА	S _K , ВА	S _C , ВА	P _R , Вт	P _K , Вт	Q _K , ВАр	Q _C , ВАр	R, Ом	X, Ом	Z, Ом

3.10. Проверить баланс активных мощностей в цепи.

3.11. По результатам измерений для исследованных цепей вычислить значение коэффициента мощности $\cos\phi$ и угла сдвига фаз, построить в масштабе векторные диаграммы и объяснить их различие.

3.12. Объяснить влияние величины емкости конденсатора на режим работы исследованной цепи.

3.13. Сделать вывод о применении 2-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока.

Контрольные вопросы

1. Какой ток называется переменным?
2. Дайте определение мгновенного, амплитудного и действующего значений переменного тока. Какая связь между ними?
3. В последовательной R-L-C цепи напряжение на активном элементе меняется по закону $u_R = U_{m_R} \sin \omega t$. Запишите законы изменения тока и напряжений на реактивных элементах.
4. В последовательной R-L-C цепи индуктивное сопротивление больше емкостного. Как изменится ток в цепи, если частота питающего напряжения увеличится?
5. Запишите закон Ома для последовательной R-L-C цепи в действующих значениях напряжений и токов.
6. Что такое коэффициент мощности?
7. Запишите условие резонанса напряжений.
8. Почему напряжение на реальной катушке в момент резонанса не равно напряжению на зажимах конденсатора?
9. Напишите выражение активной мощности в последовательной R-L-C цепи.
10. Начертите треугольник сопротивлений и, руководствуясь им, напишите формулы, выражающие:
 - полное сопротивление цепи,
 - активное сопротивление цепи,
 - угол сдвига фаз между током и напряжением.