

Научно-производственное предприятие
«Учебная техника – Профи»

«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ»

Методические указания
к проведению лабораторных работ

Челябинск
2009г.

Бородянко В.Н. Электрические цепи: Методические указания к проведению лабораторных работ на стендах «Электрические цепи». – Челябинск: ЮУрГУ, 2009.

Методические указания предназначены для студентов средних и высших учебных заведений, в которых предусмотрено изучение курса «Электротехника основы электроники». Методические указания также могут быть использованы для обучения учащихся профессионально-технических училищ и слушателей отраслевых учебных центров повышения квалификации инженерно-технических работников.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	с.
1. Общие рекомендации по осуществлению лабораторного эксперимента	4
1.1. Цель лабораторных занятий	4
1.2. Подготовка к лабораторному занятию	4
1.3. Проведение эксперимента	5
1.4. Обработка результатов и оформление отчета	6
2. Методические указания к проведению лабораторных работ	8
Работа № 1. Электроизмерительные приборы и измерения	8
Работа № 2. Линейные электрические цепи постоянного тока	13
Работа № 3. Экспериментальное определение параметров элементов цепей переменного тока	15
Работа № 4. Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением элементов	21
Работа № 5. Электрическая цепь переменного тока с параллельным соединением элементов	25
Работа № 6. Трехфазная электрическая цепь при соединении потребителей по схеме «звезда»	28
Работа № 7. Трехфазная электрическая цепь при соединении потребителей по схеме «треугольник»	32
Работа № 8. Нелинейная цепь постоянного тока	35
Работа № 9. Нелинейная цепь переменного тока	39

1. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

1.1. Цель лабораторных занятий

Важнейшей частью курса «Электротехника и основы электроники» является лабораторный практикум. Чтобы знать электротехнику и основы электроники, необходимо научиться самостоятельно решать разнообразные электротехнические задачи. Решение этих задач может быть получено, как известно, аналитическим или экспериментальным методом. Экспериментальные методы решения изучаются на лабораторных занятиях.

Лабораторные занятия дают возможность:

- закрепить на практике теоретические сведения о работе различных электротехнических и электронных устройств;
- подробно ознакомиться с устройством и характеристиками наиболее важных электротехнических и электронных приборов, аппаратов и машин, составляющих предмет лабораторной практики;
- помочь овладеть практическими способами управления и настройки электротехнических устройств на заданный режим;
- получить практические навыки в проведении измерений электрических величин, пользовании различными измерительными приборами и аппаратами, чтении электрических схем, построении графиков и характеристик;
- научить технике проведения экспериментального исследования физических моделей или промышленных образцов электротехнических и электронных устройств;
- выработать умение рассуждать о рабочих свойствах и степени пригодности исследованных электротехнических устройств для решения тех или иных задач.

В соответствии с государственными образовательными стандартами по курсам электротехники и основы электроники лабораторные работы должны выполняться по разделам электрические цепи постоянного и переменного тока, трехфазные электрические цепи, трансформаторы и электрические машины постоянного и переменного тока, основы электроники.

1.2. Подготовка к лабораторному занятию

Экспериментальные задачи, предлагаемые на лабораторных занятиях, могут быть успешно решены в отведенное в соответствии с расписанием занятий время только при условии тщательной предварительной подготовки к каждой из них.

Студент, в первую очередь, должен твердо уяснить цель задания и четко представлять назначение устройства, его условное обозначение на электрических схемах, принцип действия и основные характеристики.

Затем, по материалам руководства необходимо ознакомиться с основными параметрами объекта исследования, источников питания и других используемых в стенде преобразователей и пускорегулирующих аппаратов. Эти сведения нужны для определения диапазона возможного изменения величин и необходимого режима работы объекта исследования. Требуемые расчетные соотношения и

формулы следует найти и записать самостоятельно на основе изучения учебных пособий.

Особое внимание следует уделить измерительным приборам. В соответствии с каждым этапом рабочего задания необходимо проанализировать схему соединений, состоящую из элементов объекта исследования и электроизмерительных приборов. При этом рекомендуется заготовить таблицы для записи показаний приборов.

Одним из важных этапов подготовки к выполнению лабораторной работы является изучение технологии проведения эксперимента, используя методические рекомендации к выполнению рабочего задания.

Завершает этап подготовки к выполнению лабораторной работы составление ответов на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях.

1.3. Проведение эксперимента

Получив разрешение преподавателя на проведение лабораторного исследования, следует немедленно приступить к сборке электрических цепей на рабочем месте. Рекомендуется придерживаться следующего порядка, значительно облегчающего работу по сборке и избавляющего от многих ошибок при соединениях. Общим правилом является соединение сначала участков цепи с последовательным соединением элементов и приборов, а затем параллельных ветвей как объекта исследования, так и приборов.

Этот прием позволяет сознательно подойти к оценке назначения каждого элемента цепи тем самым правильно осуществить её сборку.

Одновременно со сборкой цепи надо произвести маркировку измерительных приборов в соответствии с их условными обозначениями на рабочей схеме соединений. Маркировку приборов можно выполнить с помощью бумажных бирок, которые заготавливает учащийся, выполняющий лабораторное исследование.

Во избежание возможного возникновения больших токов в собранной цепи элементы регулирования потенциометров необходимо устанавливать в положение, соответствующее минимуму напряжения на выходе.

Собранную цепь следует обязательно показать для проверки преподавателю. Только с его разрешения можно включить источник питания и произвести предварительное опробование работы цепи, чтобы убедиться в возможности проведения опыта при заданных пределах измерения величин. Нельзя приступать к измерениям, не будучи совершенно уверенным, что цепь собрана правильно.

Если при испытании цепи постоянного тока стрелка измерительного прибора уходит за пределы шкалы в обратном направлении, надо отключить цепь и переключить подходящие к прибору провода.

При снятии характеристик недопустимо превышать номинальные значения токов и напряжений испытываемого электротехнического устройства, если нет особых указаний в руководстве по лабораторному эксперименту. В случае, если стрелка какого-либо прибора выходит за пределы шкалы, надо немедленно отключить цепь от источника питания, доложить преподавателю или лаборанту и

изменить условия эксперимента (уменьшить напряжение питания, увеличить диапазон изменения сопротивления и т.д.).

После предварительного опробования цепи, проверки или оценки диапазона изменения переменного параметра необходимо наметить последовательность отдельных манипуляций и отсчетов, а затем приступить к наблюдениям.

Отсчеты рекомендуется проводить по возможности одновременно по всем приборам. Следует избегать перерыва начатой серии наблюдений и во всех случаях, когда возникает сомнение в правильности полученных наблюдений, их необходимо повторить несколько раз.

Результаты всех первичных наблюдений и отсчетов записывают в таблицу протокола испытаний. Запись отсчетов должна вестись в точном соответствии с показаниями измерительных приборов. Протоколы наблюдений являются единственным документальным следом, остающимся от измерений, поэтому от точной и своевременной фиксации в таблицах результатов отсчета в значительной степени зависит успех экспериментальной работы.

При переходе от одного этапа исследования к другому необходимо каждый раз обращаться к преподавателю за проверкой правильности полученных результатов, которые представляют в виде таблиц или графиков.

К следующему этапу работы разрешается приступить только после проверки и визирования протокола преподавателем.

1.4. Обработка результатов и оформление отчета

Каждый студент самостоятельно должен обрабатывать данные опытов и подготовить отчет по каждой проделанной работе.

В отчете на титульном листе указываются название учебного заведения, кафедры. Номер и наименование работы, фамилия и инициалы студента, выполнившего работу, номер его академической группы.

Отчет должен содержать, паспортные данные объекта исследования, схемы соединения элементов объекта исследования с включенными измерительными приборами, таблицы с записью результатов эксперимента, графики зависимостей и векторные диаграммы.

После проведения эксперимента должны быть сделаны основные выводы, полученные в результате исследования.

Каждая схема должна быть сопровождена соответствующей таблицей записей результатов измерений и графиком, иллюстрирующим изучаемые зависимости. В таблице обязательно следует указывать, в каких единицах измерены исследуемые величины. Все таблице необходимо снабдить заголовками, характеризующими проводимый опыт.

На основании результатов измерений проводится их окончательная обработка. Измеренные и вычисленные величины заносятся в соответствующие колонки одной и той же таблицы.

Вычерчивание схем и таблиц рекомендуется производить карандашом обязательно с помощью линейки.

Особое внимание надо уделить графикам зависимостей между величинами, т.к. они являются наглядным результатом работы, графическим ответом на вопросы, поставленные в лабораторной работе.

При построении графиков по осям приводят стандартные буквенные обозначения величин и единиц их измерения, указывают деления с одинаковыми интервалами, соответствующие откладываемым величинам в принятых единицах измерения или в десятичных кратных либо дольных единицах.

Числовые отметки у масштабных делений принято выбирать так, чтобы они составляли $10^{\pm n}$, $2 \cdot 10^{\pm n}$ или $5 \cdot 10^{\pm n}$ от тех единиц, в которых выражены величины, откладываемые по осям. Например, 10 мА; 0,02 Ом; 500 Вт.

При построении графиков вдоль оси абсцисс в выбранном масштабе откладывают независимую переменную. Условное буквенное обозначение этой величины рекомендуется ставить под осью, а наименование единиц измерения либо их десятичных кратных или дольных единиц – после обозначения величины. Вдоль оси ординат масштабные цифры ставят слева от оси, наименование или условное обозначение откладываемых величин – также слева от оси и под этим обозначением указывают единицу измерения. Если в одних координатных осях строят несколько графиков функций одной независимой переменной, то следует провести дополнительные шкалы параллельно основным, каждую со своим масштабом. Если величины по осям абсцисс и ординат отложены в определенном масштабе с числовыми отметками, то не следует ставить стрелок, указывающих направление роста численных значений величин. Наименование единиц измерения дается без скобок. При вычерчивании графиков надо учитывать, что всякое измерение имеет случайные погрешности (истинное значение измеряемой величины остается неизвестным, а вместо него принимают некоторое её значение, признаваемое за наиболее приближающееся к истинному). Поэтому не следует проводить кривые через все экспериментальные точки. На графике необходимо проводить плавные непрерывные кривые, которые проходят среди экспериментальных точек. Отступление некоторых точек от плавной кривой называют «разбросом точек». Величина разброса при наблюдении закономерных явлений определяет тщательность проведения эксперимента.

При наличии нескольких кривых на одном графике точки, соответствующие опытным данным и относящиеся к различным кривым, должны быть помечены условными значками (крестиками, кружками и т. п.).

Каждый график обязательно должен быть снабжен таким лаконичным текстом, чтобы любой достаточно подготовленный читатель мог легко понять, какую зависимость характеризует построенный график.

На последней странице отчета следует указать дату оформления и поставить подпись.

Отчет в целом должен быть составлен таким образом, чтобы для понимания содержания и результатов проведенной работы не требовалось дополнительных устных пояснений. Составление подобных отчетов – первый шаг к оформлению технических отчетов по экспериментальным исследованиям, которые предстоит проводить будущему инженеру.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Работа № 1. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

1. Цель работы

Изучение электроизмерительных приборов, используемых в лабораторных работах, выполняемых на стенде. 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.

2. Пояснения к работе

Контроль работы электрооборудования осуществляется с помощью разнообразных электроизмерительных приборов. Наиболее распространенными электроизмерительными приборами являются приборы непосредственного отсчета. По виду отсчетного устройства различают аналоговые (стрелочные) и цифровые измерительные приборы.

На лицевой стороне стрелочных приборов изображены условные обозначения, определяющие классификационную группу прибора. Они позволяют правильно выбрать приборы и дают некоторые указания по их эксплуатации.

В цепях постоянного тока для измерений токов и напряжений применяются в основном приборы магнитоэлектрической системы. Принцип действия таких приборов основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и измеряемого тока, протекающего по катушке. Угол поворота стрелки α прямо пропорционален измеряемому току I : $\alpha = K I$. Шкалы магнитоэлектрических приборов равномерные.

В измерительных механизмах электромагнитной системы, применяемых для измерений в цепях переменного и постоянного тока, вращающий момент обусловлен действием магнитного поля измеряемого тока в неподвижной катушке прибора на подвижный ферромагнитный якорь. Угол поворота стрелки α здесь пропорционален квадрату тока: $\alpha = K I^2$. Поэтому шкала электромагнитных приборов обычно неравномерная, что является недостатком этих приборов. Начальная часть шкалы не используется для измерений.

Для практического использования измерительного прибора необходимо знать его предел измерений (номинальное значение) и цену деления (постоянную) прибора. Предел измерений – это наибольшее значение электрической величины, которое может быть измерено данным прибором. Это значение обычно указано на лицевой стороне прибора. Один и тот же прибор может иметь несколько пределов измерений. Ценой деления прибора называется значение измеряемой величины, соответствующее одному делению шкалы прибора. Цена деления прибора C легко определяется как отношение предела измерений $A_{НОМ}$ к числу делений шкалы N : $C = A_{НОМ} / N$.

На лицевой стороне стрелочных прибора указывается класс точности, который определяет приведенную относительную погрешность прибора $\gamma_{пр}$.

Приведенная относительная погрешность прибора – это выраженное в процентах отношение максимальной для данного прибора абсолютной погрешности ΔA к номинальному значению прибора (пределу измерений) $A_{НОМ}$: $\gamma_{ПР} = 100 \Delta A / A_{НОМ} \%$.

Зная класс точности прибора, можно определить абсолютную ΔA и относительную погрешности измерения $\gamma_{ИЗМ}$, а также действительное значение измеряемой величины A_d :

$$\Delta A = \gamma_{ПР} A_{НОМ} / 100; \quad \gamma_{ИЗМ} = 100 \Delta A / A; \quad A_d = A \pm \Delta A.$$

Нетрудно сделать вывод, что относительная погрешность измерения тем больше, чем меньше измеряемая величина по сравнению с номинальным значением прибора. Поэтому желательно не пользоваться при измерении начальной частью шкалы стрелочного прибора.

Для обеспечения малой методической погрешности измерения необходимо, чтобы сопротивление амперметра было значительно меньше сопротивления нагрузки, а сопротивление вольтметра было значительно больше сопротивления исследуемого участка.

При проведении измерений в электрических цепях широкое применение получили цифровые мультиметры – комбинированные цифровые измерительные приборы, позволяющие измерять постоянное и переменное напряжение, постоянный и переменный ток, сопротивления, проверять диоды и транзисторы. Для проведения конкретного измерения необходимо установить переключателем предполагаемый предел измерений измеряемой величины (ток, напряжение, сопротивление) с учетом рода тока (постоянный или переменный). Представление результата измерения происходит на цифровом отсчетном устройстве в виде обычных удобных для считывания десятичных чисел. Наибольшее распространение в цифровых отсчетных устройствах мультиметров получили жидкокристаллические, газоразрядные и светодиодные индикаторы. На передней панели такого прибора находится переключатель функций и диапазонов. Этот переключатель используется как для выбора функций и желаемого предела измерений, так и для выключения прибора. Для продления срока службы источника электропитания прибора переключатель должен находиться в положении «OFF» в тех случаях, когда прибор не используется.

К основным техническим характеристикам цифровых приборов, которые необходимо учитывать при выборе относятся:

- диапазон измерений (обычно прибор имеет несколько поддиапазонов);
- разрешающая способность, под которой часто понимают значение измеряемой величины, приходящееся на единицу дискретности, то есть один квант;
- входное сопротивление, характеризующее собственное потребление прибором энергии от источника измерительной информации;
- погрешность измерения, часто определяемая как $\pm(\% \text{ от считываемых данных} + \text{количество единиц младшего разряда})$.

Мультиметр часто имеет батарейное питание 9 В, поэтому перед использованием прибора необходимо проверить батарею электропитания путем включения прибора. Если батарея разряжена, то на дисплее возникнет условное изображение батареи. Используемые в стенде «Электротехника» мультиметры питаются от выпрямительного устройства, вмонтированного в модуль. Для

использования приборов необходимо подключить с тыльной стороны кабель питания к источнику переменного напряжения 220 В. Перед проведением измерения необходимо переключатель пределов установить на требуемый диапазон измерений. Для предотвращения повреждения схемы прибора входные токи и напряжения не должны превышать указанных величин. **Если предел измеряемого тока или напряжения заранее неизвестен, следует устанавливать переключатель пределов на максимум и затем переключать его вниз по мере необходимости.**

Используемые в данном стенде мультиметры, имеют режим автоматического выбора поддиапазона измерений. С помощью кнопочного переключателя «R-N» можно устанавливать поддиапазон измерения вручную.

Для измерения **напряжения** подключите один щуп к разъему COM, а другой – к разъему «V/Ω», установите переключатель функций в положение «V» и с помощью кнопочного переключателя установите режим измерения постоянного (DC) или переменного (AC) напряжения. Подсоедините концы щупов к измеряемому источнику напряжения. При измерении постоянного напряжения полярность напряжения на дисплее будет соответствовать полярности напряжения на втором щупе. Некоторые характеристики используемого мультиметра при измерении постоянного напряжения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Поддиапазон измерений	Погрешность измерения	Разрешающая способность
4 В	$\pm 0.5\%$ of rdg ± 3 digits	1 мВ
40 В	$\pm 0.5\%$ of rdg ± 3 digits	10 мВ
400 В	$\pm 0.5\%$ of rdg ± 3 digits	0,1 В
1000 В	$\pm 0.8\%$ of rdg ± 3 digits	1 В

Некоторые характеристики используемого мультиметра при измерении переменного напряжения представлены в табл. 2.

Для измерения **сопротивлений** подключите один щуп к разъему «COM», а второй – к разъему «V/Ω», установите переключатель функций на «Ω» и подсоедините концы щупов к измеряемому сопротивлению.

Таблица 2

Поддиапазон измерений	Погрешность измерения	Разрешающая способность
4 В	$\pm 1,2\%$ of rdg ± 5 digits	1 мВ
40 В	$\pm 1,2\%$ of rdg ± 5 digits	10 мВ
400 В	$\pm 1,2\%$ of rdg ± 5 digits	0,1 В
750 В	$\pm 1,5\%$ of rdg ± 5 digits	1 В

Когда цепь разомкнута, на индикаторе будет индицироваться «0L».

Перед измерением сопротивлений в схеме убедитесь, что схема обесточена и все конденсаторы разряжены.

Некоторые характеристики используемого мультиметра при измерении сопротивлений представлены в табл. 3

Таблица 3

Поддиапазон измерений	Погрешность измерения	Разрешающая способность
400 Ом	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	0.1 Ом
4 кОм	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	1 Ом
40 кОм	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	10 Ом
400 кОм	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	100 Ом
4 МОм	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	1 кОм
40 МОм	$\pm 3,0 \% \text{ of rdg} \pm 5 \text{ digits}$	10 кОм

3. Порядок выполнения работы

3.1. Изучение паспортных характеристик стрелочных электроизмерительных приборов. Для этого внимательно рассмотреть лицевые панели стрелочных амперметров и заполнить табл. 4.

Таблица 4

Характеристика электроизмерительного прибора			
Наименование прибора	Амперметр	Амперметр	Вольтметр
Система измерительного механизма			
Предел измерения			
Число делений шкалы			
Цена деления			
Минимальное значение измеряемой величины			
Класс точности			
Допустимая максимальная абсолютная погрешность			
Род тока			
Нормальное положение шкалы			
Прочие характеристики			

3.2. Построить график зависимости относительной погрешности измерения от измеряемой величины $\gamma_{\text{изм}} = f(A_{\text{изм}})$ для прибора, указанного преподавателем. Сделать вывод о величине относительной погрешности измерения в начальной и конечной части шкалы, о характере изменения погрешности вдоль шкалы прибора.

3.3. Ознакомиться с лицевой панелью мультиметра и зарисовать её.

3.4. Подготовить мультиметр для измерения постоянного напряжения. Включить электропитание стенда (автоматический выключатель QF модуля питания) и источник постоянного напряжения. Измерить значения выходных напряжений модуля питания на клеммах «+5 В», «+12 В» и «-12 В» относительно общей клеммы. Результаты измерений занести в табл. 5. Выключить источник постоянного напряжения.

Таблица 5

Клеммы	+5 В	+12 В	-12 В	~12 В	~ 220 В
Измерено					

3.5. Подготовить мультиметр для измерения переменного напряжения. Включить источник питания и мультиметром измерить значения выходных напряжений на клеммах «~12 В» и «~220 В». Результаты измерений занести в табл. 5. Выключить источник трехфазного напряжения.

3.6. Подготовить мультиметр для измерения сопротивлений резисторов. Измерить значения сопротивлений резисторов, указанных преподавателем. Результаты занести в табл. 6.

Таблица 6

Резистор	R1	R2	R3	R4
Номинальное значение сопротивления, Ом	5	10	20	30
Измерено, Ом				

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) технические данные измерительных приборов;
- в) график зависимости относительной погрешности измерений $\gamma_{\text{изм}} = f(A_{\text{изм}})$;
- г) результаты измерений;
- д) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия приборов магнитоэлектрической и электромагнитной систем?
2. Что такое предел измерения?
3. Как определяется цена деления прибора?
4. Что такое абсолютная и относительная погрешности измерения?
5. Что характеризует класс точности прибора?
6. В какой части шкалы прибора измерение точнее и почему?
7. Каковы основные достоинства цифровых измерительных приборов?

Работа № 2. ЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. 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.

2. Пояснения к работе

Электрическая цепь, состоящая из элементов, вольтамперные характеристики которых являются прямыми линиями, называется линейной электрической цепью, а элементы, из которых состоит цепь, – линейными элементами.

Соединение в электрической цепи, при котором через все элементы протекает один и тот же ток, называется последовательным соединением. Эквивалентное сопротивление R_{Σ} последовательной цепи постоянного тока равно сумме сопротивлений отдельных участков: $R_{\Sigma} = R_1 + R_2$.

Напряжение на отдельном участке в соответствии с законом Ома пропорционально сопротивлению этого участка: $U_1 = I R_1$; $U_2 = I R_2$.

Напряжение U на входе последовательной цепи в соответствии со вторым законом Кирхгофа равно сумме напряжений на отдельных участках:

$$U = U_1 + U_2.$$

При параллельном соединении двух или нескольких элементов напряжение на них одно и то же, так как выводы этих элементов подключены к одним и тем же узлам. Токи в отдельных элементах определяются по закону Ома: $I_1 = U / R_1$; $I_2 = U / R_2$.

В соответствии с первым законом Кирхгофа ток I в неразветвленной части цепи равен сумме токов всех параллельных ветвей: $I = I_1 + I_2$.

Проводимость параллельного соединения равна сумме проводимостей отдельных участков: $1/R_{\Sigma} = 1/R_1 + 1/R_2$.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль резисторов, модуль измерительный, модуль мультиметров, измеритель мощности) и собрать линейную электрическую цепь с последовательным соединением резисторов (рис. 1). Установить заданные преподавателем значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 . Представить схему для проверки преподавателю.

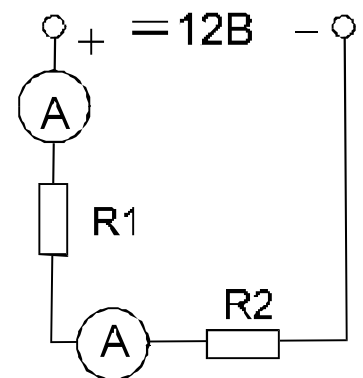


Рис. 1

3.2. Включить электропитание стенда (автоматический выключатель QF1 модуля питания и выключатель SA2 этого же модуля). Измерить ток в цепи, величину напряжения питания и напряжения на резисторах R_1 и R_2 в схеме с последовательным соединением резисторов R_1 и R_2 . Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить питание.

3.3. Собрать линейную цепь со смешанным соединением резисторов (рис. 2). Установить заданные значения резисторов R_1 , R_2 и R_3 . Включить питание и измерить напряжения и токи на всех участках цепи, мощность, потребляемую цепью. Результаты занести в табл. 1.

3.5. Выключить источник электропитания, и используя мультиметр в режиме измерения сопротивления измерить значения сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 . Результаты измерений занести в табл. 2.

3.6. Используя закон Ома, вычислить значения сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 , значения которых занести в табл. 2.

3.7. Проверить выполнение баланса мощностей.

Сделать выводы о выполнении 1-го и 2-го законов Кирхгофа и о применении закона Ома в линейной цепи постоянного тока.

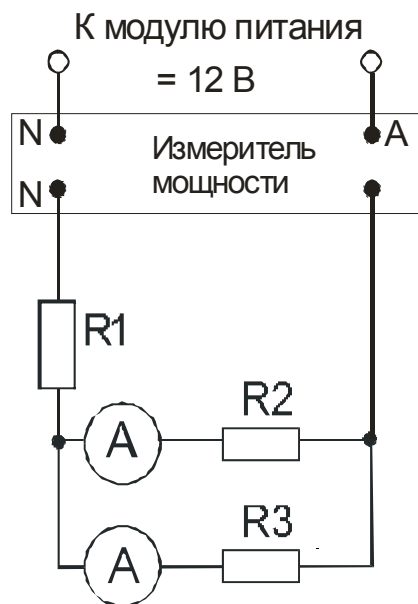


Рис.2

Таблица 1

U, В	Последовательное соединение				Смешанное соединение						
	U1, В	U2, В	I1, А	I2, А	U1, В	U2, В	U3, В	I1, А	I2, А	I3, А	P, Вт

Таблица 2

	Измерено омметром	Вычислено
R_1 , Ом		
R_2 , Ом		
R_3 , Ом		

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- наименование работы и цель работы;
- технические данные измерительных приборов;
- схемы экспериментов и таблицы полученных экспериментальных данных;
- результаты расчетов;
- выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

- Что такое «линейный элемент» в электрической цепи?
- Привести примеры линейных элементов электрических цепей.
- На основании какого закона по показаниям амперметра и вольтметра можно определить величину сопротивления участка электрической цепи постоянного тока?
- В каких единицах измеряются сила тока, напряжение и сопротивление?
- Нарисуйте схемы для измерения методом амперметра и вольтметра больших и малых электрических сопротивлений.
- Для исследуемых электрических цепей запишите уравнения по законам Кирхгофа.

Работа № 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы

Приобретение навыков определения параметров элементов в цепях переменного тока по результатам измерений, включения в цепь вольтметра и амперметра, измерения тока и напряжения, применения закона Ома в цепи переменного тока.

2. Пояснения к работе

При расчете цепей переменного тока, в отличие от цепей постоянного тока, необходимо учитывать не один, а три простейших пассивных элемента: резистивный, индуктивный и емкостной, которые характеризуются соответственно параметрами: активным сопротивлением R , индуктивностью L (индуктивным сопротивлением $X_L = \omega L$) и емкостью C (емкостным сопротивлением $X_C = 1/\omega C$), где ω – угловая частота.

В реальной цепи сопротивлением обладают не только резистор или реостат как устройства, предназначенные для использования их электрических сопротивлений, но и любой проводник, катушка, конденсатор, обмотка любого электромагнитного элемента и др. Общим свойством всех устройств, обладающих электрическим сопротивлением, является необратимое преобразование электрической энергии в тепловую энергию. При токе i в резисторе, обладающим сопротивлением r за время dt в соответствии с законом Джоуля – Ленца выделяется энергия $dw = ri^2 dt$.

Тепловая энергия, выделяемая в сопротивлении, полезно используется или рассеивается в пространстве. Но поскольку преобразование электрической энергии в тепловую энергию в пассивном элементе носит необратимый характер, то в схеме замещения во всех случаях, когда необходимо учесть необратимое преобразование энергии, включается сопротивление. В реальном устройстве, например, в электромагните, электрическая энергия может быть преобразована в механическую энергию (притяжение якоря), но в схеме замещения это устройство заменяется сопротивлением, в котором выделяется эквивалентное количество тепловой энергии. И при анализе схемы нам уже безразлично, что в действительности является потребителем энергии электромагнит или электроплитка.

В цепях переменного тока сопротивление называют активным, которое из-за явления поверхностного эффекта больше, чем электрическое сопротивление постоянному току. Однако при низких частотах этой разницей обычно пренебрегают.

Напряжение, подведенное к активному сопротивлению, по фазе совпадает с током, то есть напряжение и ток одновременно достигают максимальных значений и одновременно переходят через нуль. Если мгновенное значения тока имеет вид $i(t) = I_M \sin 2\pi ft$, то мгновенное значение напряжения будет $u_R(t) = U_M \sin 2\pi ft$.

Индуктивность L характеризует свойство участка цепи или катушки накапливать энергию магнитного поля. В реальной цепи индуктивностью обладают не только индуктивные катушки как элементы цепи, предназначенные

для использования их индуктивности, но и провода, и выводы конденсаторов, и реостаты. В целях упрощения обычно считают, что энергия магнитного поля сосредотачивается только в катушках.

При протекании переменного тока $i(t)$ через катушку индуктивности, состоящей из w витков, возбуждается переменный магнитный поток $\Phi(t)$, который в соответствии с законом электромагнитной индукции наводит в ней же э.д.с. самоиндукции $e_L = -w d\Phi/dt = -L di/dt$. Следовательно, индуктивность в цепи переменного тока влияет на величину протекающего тока как сопротивление. Соответствующая расчетная величина называется индуктивным сопротивлением и обозначается X_L и измеряется так же, как и активное сопротивление – в Омах.

Чем выше частота переменного тока, тем больше э.д.с. самоиндукции и тем больше индуктивное сопротивление $X_L = \omega L = 2\pi f L$. Величина $\omega = 2\pi f$ называется угловой частотой переменного тока.

В цепи постоянного тока в установившемся режиме индуктивность не влияет на режим работы цепи, так как э.д.с. самоиндукции равна нулю.

Поскольку э.д.с. самоиндукции возникает только при изменении тока, то и максимальные значения э.д.с. наступают при максимальной скорости изменения тока в катушке, то есть при прохождении тока через нуль. Поэтому на участке цепи с индуктивностью э.д.с. самоиндукции по времени отстает от тока на четверть периода или на $\pi/2$ электрических радиана. Напряжение на индуктивности, будучи противоположным по направлению э.д.с., наоборот, опережает ток на четверть периода или на $\pi/2$ электрических радиана. Если по катушке проходит ток, мгновенное значение которого $i(t) = I_M \sin 2\pi f t$, то мгновенное значение напряжения на индуктивности $u_L(t) = U_M \sin (2\pi f t + \pi/2) = X_L I_M \sin (2\pi f t + \pi/2)$. Когда напряжение, изменяясь синусоидально, достигает максимума, ток в это мгновение равен нулю. Если напряжение на зажимах элемента цепи опережает ток на $\pi/2$ радиана, то говорят, что такой элемент представляет собой идеальную катушку индуктивности или чисто реактивное индуктивное сопротивление X_L . Это сопротивление учитывает реакцию электрической цепи на изменение магнитного поля в индуктивности и является линейной функцией частоты.

При включении в цепь переменного тока реальной катушки (рис. 1), обладающей кроме индуктивности L и некоторым значением активного сопротивления R , ток отстает по фазе от напряжения на некоторый угол $\varphi < \pi/2$, который легко определяется из треугольника сопротивлений (рис. 3): $\operatorname{tg} \varphi = X_L / R$. Для такого участка электрической цепи уравнение на основании второго закона Кирхгофа имеет вид:

$$u = u_R + u_L = Ri + L di/dt.$$

В напряжении, подведенном к реальной катушке, условно можно выделить две составляющих: падение напряжения Ri на активном сопротивлении, обычно называемое активной составляющей приложенного напряжения, и напряжение на идеальной индуктивности $u_L = L di/dt$, называемое реактивной составляющей приложенного напряжения. Фазовые соотношения между этими составляющими обычно иллюстрируют векторной диаграммой для их действующих значений (рис. 2).

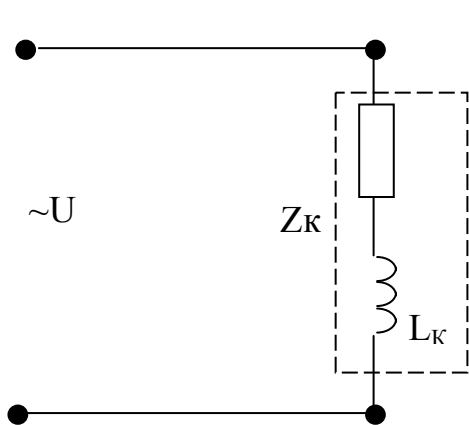


Рис. 1

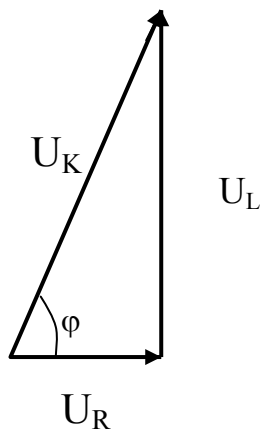


Рис. 2

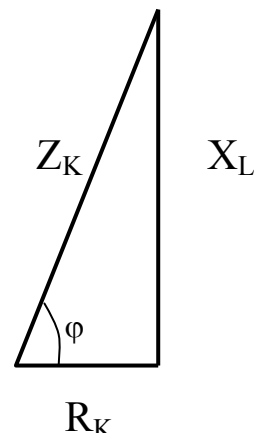


Рис. 3

Из векторной диаграммы видно, что

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_L^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2} = I Z,$$

где $Z = U_M / I_M = U / I = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ – полное электрическое сопротивление реальной катушки. Из треугольника сопротивлений (рис. 3) следует, что

$$R = Z \cos \varphi, X_L = Z \sin \varphi, \varphi = \arctg X_L / R.$$

Закон Ома для цепи, по которой протекает переменный ток, записывается в виде $I = U / Z$.

Из рассмотренного следует важный вывод: **сопротивления в цепи переменного тока складываются в общем случае геометрически**. Например, если у катушки $R=3$ Ома и $X_L=4$ Ома, то $Z=5$ Ом.

Емкость, измеряемая в фарадах (Ф), характеризует способность элемента электрической цепи или конденсатора накапливать энергию электрического поля. В реальной цепи емкость существует не только в конденсаторах, как элементах предназначенных специально для использования их емкости, ноли между проводниками, между витками катушек (межвитковая емкость), между проводом и землей или каркасом электротехнического устройства. Однако в схемах замещения принято, что емкостью обладают только конденсаторы.

В конденсаторе, точнее в диэлектрике, разделяющем пластины или проводники конденсатора, может существовать ток электрического смещения, в точности равный току проводимости в проводниках, присоединенных к обкладкам конденсатора: $i = dq / dt$, где q – заряд на обкладках конденсатора, измеряемый в кулонах и пропорциональный напряжению на конденсаторе U_C :

$$q = C U_C, \text{ и при } C = \text{const} \quad dq = C dU_C.$$

Тогда ток, проходящий через конденсатор, $i = C dU_C / dt$, а энергия электрического поля, запасаемая в конденсаторе при возрастании напряжения, $W = C U_C^2 / 2$.

Очевидно, что при постоянном напряжении $dU_C / dt = 0$ и постоянный ток через конденсатор проходить не может. При изменении напряжения на обкладках конденсатора через него протекает емкостной ток. Чем быстрее изменяется напряжение, тем больше величина емкостного тока. Если приложить к конденсатору переменное синусоидальное напряжение, то через конденсатор потечет переменный синусоидальный ток, сдвинутый по фазе на $\pi/2$ по отношению к напряжению. Это происходит потому, что емкостной ток достигает максимального значения при максимальном изменении напряжения, т.е. при

прохождении напряжения через нуль. Ток при этом опережает напряжение по фазе на $\pi/2$. Если мгновенное значение тока, протекаемого через конденсатор $i(t) = I_M \sin 2\pi ft$, то мгновенное значение напряжения на нем

$$u_C(t) = U_M \sin(2\pi ft - \pi/2) = X_C I_M \sin(2\pi ft - \pi/2),$$

где X_C – реактивное емкостное сопротивление. Векторная диаграмма для участка электрической цепи, содержащей конденсатор, изображена на рис. 4.

Величина $X_C = 1/2\pi fC = 1/\omega C = U_{Cm} / I_m = U_C / I$ называется реактивным емкостным сопротивлением. Это сопротивление учитывает реакцию электрической цепи на изменение электрического поля в конденсаторе и является обратно пропорциональной функцией частоты.

Закон Ома для участка электрической цепи с конденсатором $I = U_C / X_C$, где I – действующее значение тока, протекаемого через конденсатор, U_C – действующее значение напряжения на конденсаторе.

Электрическая цепь переменного тока характеризуется активной, реактивной и полной мощностью. Активная мощность P , измеряемая в ваттах (Вт), равна произведению действующего значения напряжения U на действующее значение ток I и на $\cos\varphi$, называемый коэффициентом мощности, или произведению квадрата действующего значения тока на активное сопротивление:

$$P = UI \cos\varphi = I^2 R.$$

Реактивная мощность Q , измеряемая в вольт-амперах реактивных (Вар), равна произведению действующего значения напряжения U на действующее значение тока I и на $\sin\varphi$ или произведению квадрата действующего значения тока на реактивное сопротивление:

$$Q = UI \sin\varphi = I^2 X.$$

Полная мощность S , измеряемая в вольт-амперах (ВА), равна произведению действующего значения тока I на действующее значение напряжения U :

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Соотношения этих мощностей иллюстрируются треугольником мощностей (рис. 5).

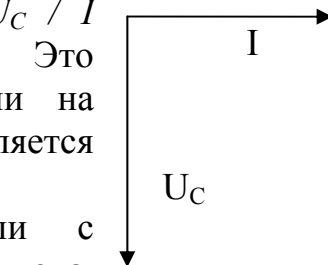


Рис. 4

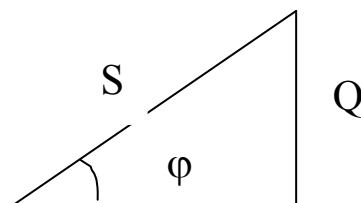


Рис. 5

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль резисторов, модуль реактивных элементов, модуль мультиметров, модуль измерительный с амперметрами переменного тока).

3.2. Установить на мультиметре режим измерения сопротивления, подключить его выводы параллельно резистору $R1$ модуля резисторов и провести измерение значений его сопротивлений. Результат записать в табл. 1.

Таблица 1

Установлено	5 Ом	10 Ом	20 Ом	30 Ом	40 Ом	50 Ом
Измерено						

3.3. Аналогично п. 3.2 провести измерение активного сопротивления R_K реальной катушки индуктивности Z_K . Результат записать в табл. 2.

Таблица 2

$R_K, \text{Ом}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$Z_K = U/I, \text{Ом}$	$X_K, \text{Ом}$	$L, \text{Гн}$

3.4. Собрать электрическую цепь для определения полного сопротивления катушки (рис. 6), используя мультиметр в режиме измерения переменного напряжения. Предъявить схему для проверки преподавателю.

3.5. Включить цепь и записать в табл. 2 показания амперметра и вольтметра (мультиметра).

3.6. Собрать электрическую цепь для определения емкостного сопротивления (рис. 7), используя мультиметр в режиме измерения переменного напряжения. Установить с помощью переключателя SA1 модуля реактивных элементов заданное преподавателем значение емкости конденсатора. Предъявить схему для проверки преподавателю.

3.7. Включить цепь и записать в табл. 3 показания амперметра и вольтметра, устанавливая поочередно заданные значения емкостей $C1$, $C2$ и $C3$.

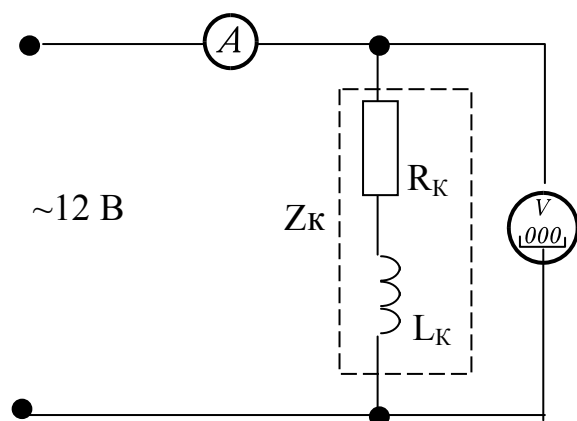


Рис. 6

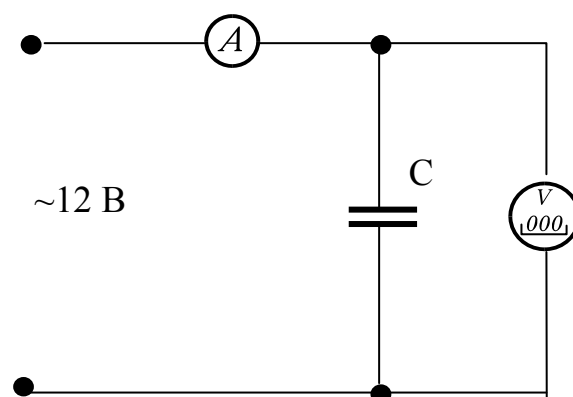


Рис. 7

Таблица 3

Включено	$C1$	$C2$	$C3$
$U, \text{В}$			
$I, \text{А}$			
$X_C, \text{Ом}$			
$C, \text{мкФ}$			

3.8. Рассчитать, используя закон Ома, полное сопротивление реальной индуктивности Z_K .

3.9. Рассчитать, используя закон Ома, емкостные сопротивления X_C . Результаты записать в табл. 2.

3.10. Считая, что частота сети $f = 50 \text{ Гц}$, определить величину индуктивности реальной катушки L и емкостей конденсаторов $C1$, $C2$ и $C3$. Результаты занести в соответствующие таблицы.

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) электрические схемы опытов;
- в) таблицы с результатами опытов и вычислений;
- г) расчетные соотношения;
- д) векторные диаграммы для резистора, реальной катушки и конденсатора;
- е) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. В каких единицах измеряется ток, напряжение, сопротивление?
2. Что такое Ом, Ампер, Вольт?
3. Что такое «полное сопротивление»?
4. Что такое «активное сопротивление»?
5. Что такое «реактивное индуктивное сопротивление» и как оно определяется?
6. Что такое «реактивное емкостное сопротивление» и как оно определяется?
7. Какая связь между полным, активным и реактивным сопротивлениями цепи переменного тока?
8. Как формулируется закон Ома для цепи переменного тока?
9. Может ли через конденсатор протекать постоянный ток?

Работа № 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

1. 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.

2. Пояснения к работе

Электрическая цепь синусоидального переменного тока с последовательным соединением резистора с активным сопротивлением R , реальной катушки индуктивности с полным сопротивлением $Z_K (R_K, X_K)$ и конденсатора с емкостным сопротивлением X_C (рис. 1) описывается уравнением, записанным по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений напряжений на этих элементах:

$$u_R + u_K + u_C = u(t)$$

или в геометрической форме для векторов действующих значений этих напряжений

$$\bar{U}_R + \bar{U}_K + \bar{U}_C = \bar{U}.$$

Последнее соотношение говорит о том, что вектор действующего значения напряжения, приложенного к такой цепи, равен геометрической сумме векторов напряжений на отдельных её участках (рис. 2).

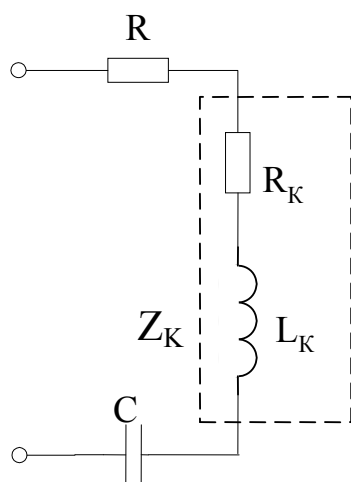


Рис. 1

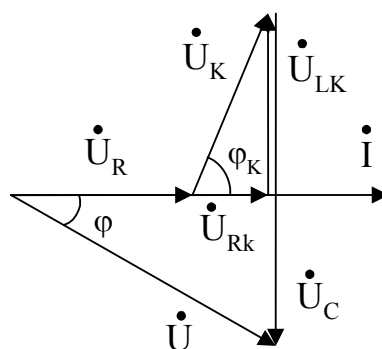


Рис. 2

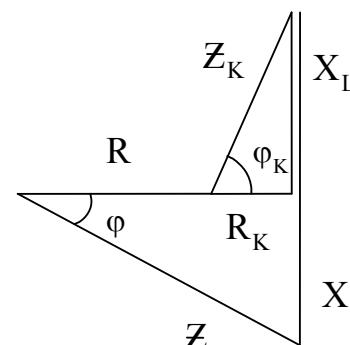


Рис. 3

Из анализа векторной диаграммы для такой цепи следует, что величина входного напряжения

$$U = \sqrt{(U_R + U_{RK})^2 + (U_{LK} - U_C)^2} = \sqrt{(IR + IR_K)^2 - (IX_L - IX_C)^2} = I \sqrt{(R + R_K)^2 + (X_L - X_C)^2},$$

где U_{RK} , U_{LK} – соответственно активная и реактивная составляющие напряжения на катушке, R_K , X_L – активное и реактивное индуктивное сопротивление катушки индуктивности.

Следовательно, действующее значение тока в этой цепи на основании закона Ома можно определить как

$$I = U / Z = U / \sqrt{(R + R_K)^2 + (X_L - X_C)^2},$$

где $Z = \sqrt{(R + R_K)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(R + R_K)^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$ – полное сопротивление цепи с последовательным соединением резистора, реальной катушки индуктивности и конденсатора, которое легко определяется из многоугольника сопротивлений (рис. 3).

Угол сдвига фаз между входным синусоидальным напряжением U и потребляемым такой цепью током I определяется из треугольника сопротивлений

$$\operatorname{tg} \varphi = (\omega L - 1/\omega C) / (R + R_K).$$

Если $\omega L > 1/\omega C$ и угол $\varphi > 0$, вся цепь ведет себя как цепь с активным сопротивлением и идеальной индуктивностью. Говорят, что в этом случае цепь носит активно-индуктивный характер.

Если $\omega L < 1/\omega C$ и угол $\varphi < 0$, вся цепь ведет себя как цепь с активным сопротивлением и емкостью. Говорят, что в этом случае цепь носит активно-емкостной характер.

Если в цепи реактивные сопротивления равны ($\omega L = 1/\omega C$), то угол $\varphi = 0$. При этом реактивная составляющая напряжения на индуктивности и напряжение на конденсаторе полностью себя компенсируют. Цепь ведет себя, как будто реактивные сопротивления в ней отсутствуют и ток достигает наибольшего значения, поскольку ток ограничивается только эквивалентным активным сопротивлением цепи

$$R_{\Sigma} = R + R_K.$$

Это означает, что в цепи имеет место резонанс, называемый в данном случае *резонансом напряжений*. Резонанс напряжений можно получить либо изменением частоты источника питания, либо подбором значения величины $C = 1/\omega_0^2 L$, где $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ – резонансная частота цепи.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль резисторов, модуль реактивных элементов, модуль мультиметров, модуль измерительный с амперметрами переменного тока, измеритель мощности).

3.2. Собрать электрическую цепь (рис. 4), установив заданные значения сопротивления резистора и емкости конденсатора. Подключить собранную цепь к источнику питания ~ 12 В (модуль питания).

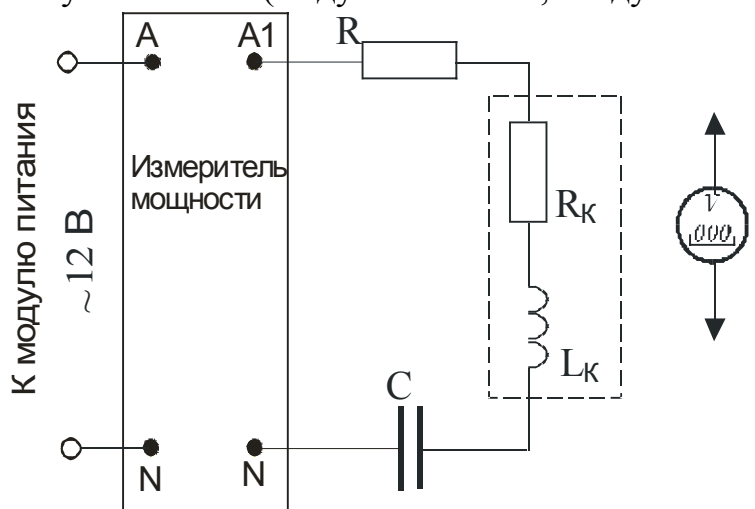


Рис. 4.

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

3.4. Включить питание стенда и произвести измерения указанных в таблице величин в цепи с последовательным соединением резистора R и катушки Z_K . Перед измерением напряжения перевести мультиметр в режим измерения переменного напряжения. Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Схема	U, В	I, А	U_R , В	U_K , В	U_C , В	P, Вт
Z_K, R					_____	
R, X_C				_____		
R, Z_K, X_{C1}						
R, Z_K, X_{C2}						
R, Z_K, X_{C3}						

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

3.6. Включить источник электропитания и произвести измерения указанных в таблице величин для цепи с последовательным соединением резистора R и конденсатора X_C . Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить электропитание, убрать дополнительный проводник.

3.7. В цепи с последовательным соединением резистора, катушки и конденсатора изменяя величину емкости конденсатора с помощью переключателя $SA1$ модуля реактивных элементов, добиться наибольшего показания амперметра, т.е. обеспечить состояние цепи близкое к резонансу напряжений. Результаты измерений занести в табл. 1.

3.8. Уменьшая и увеличивая величину емкости конденсатора (от резонансного значения) провести измерения указанных в таблице величин для двух состояний цепи. Результаты измерений занести в табл. 1.

3.9. Для цепи с последовательным соединением трех элементов (R, Z_K, C) по результатам измерений определить полную мощность цепи S и отдельных участков S_R, S_K, S_C . Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

S , ВА	S_R , ВА	S_K , ВА	S_C , ВА	P_R , Вт	P_K , Вт	P_C , Вт	Q_K , ВАр	Q_C , ВАр	R , Ом	X , Ом	Z , Ом

3.10. Учитывая значения параметров катушки, полученные в предшествующей лабораторной работе, определить активные и реактивные мощности отдельных участков, а также полное, активное и реактивное сопротивление всей цепи для одного из опытов. Результаты занести в табл. 2.

3.11. Проверить баланс активных мощностей в цепи.

3.12. По результатам измерений построить для исследованных цепей в масштабе векторные диаграммы.

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

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) схему исследуемой цепи;
- в) таблицы с результатами опытов и вычислений;
- г) расчетные соотношения;
- д) векторные диаграммы;
- е) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое активная, реактивная и полная мощности в цепи переменного тока?
2. Какая взаимосвязь между полной, активной и реактивной мощностями?
3. Что такое «коэффициент мощности»?
4. Как вычислить полное сопротивление катушки, если известны её активное сопротивление, индуктивность и частота сети?
5. Как вычислить полное сопротивление цепи с последовательным соединением резистора, реальной катушки и конденсатора?
6. От чего зависит угол сдвига фаз между напряжением и током на участке электрической цепи переменного тока?
7. Что такое «треугольник сопротивлений»?
8. Чему равны реактивное сопротивление цепи и реактивная мощность цепи при резонансе?

Работа № 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Цель работы

Ознакомиться с особенностями параллельного соединения активных и реактивных элементов в цепи переменного тока, явлением резонанса токов, повышением коэффициента мощности, применением 1-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока.

2. Пояснения к работе

При параллельном соединении элементов получают разветвленную цепь (рис. 1). При параллельном соединении элементов токи в отдельных ветвях, зависят только от напряжения источника питания и полного сопротивления каждой ветви. При этом ток в ветви с резистором I_R совпадает по фазе с напряжением источника, ток в ветви с катушкой I_K отстает по фазе от напряжения источника питания на угол φ , зависящий от активного и реактивного сопротивления реальной катушки индуктивности. Ток в ветви с конденсатором I_C опережает напряжение источника питания на 90° (рис. 2). В соответствии с первым законом Кирхгофа общий ток I , потребляемый такой цепью от источника питания, определяется геометрической суммой токов отдельных ветвей:

$$\vec{I} = \vec{I}_R + \vec{I}_K + \vec{I}_C.$$

Геометрическое построение для определения величины и фазы общего тока представлено на рис. 2, где обозначено

I_{KA} , I_A – активные составляющие тока в ветви с катушкой и общего тока;

I_{KP} , I_P – реактивные составляющие тока в ветви с катушкой и общего тока.

Под активной составляющей тока понимают условную составляющую этого тока, совпадающую по фазе с приложенным к этому участку напряжением. Под реактивной составляющей тока – составляющую, расположенную под 90° к приложенному напряжению. Следует помнить, что *активная и реактивная составляющие тока – это условные величины, не имеющие физического смысла в последовательной схеме замещения.*

Из векторной диаграммы следует, что

$$I_A = I_R + I_{KA}, \quad I_P = I_{KP} - I_C.$$

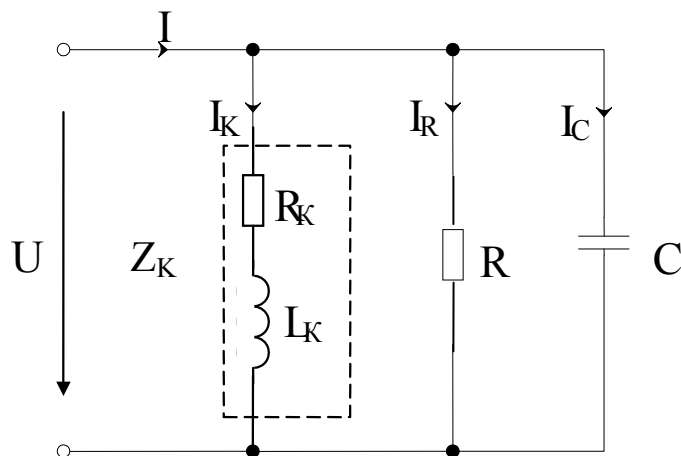


Рис. 1

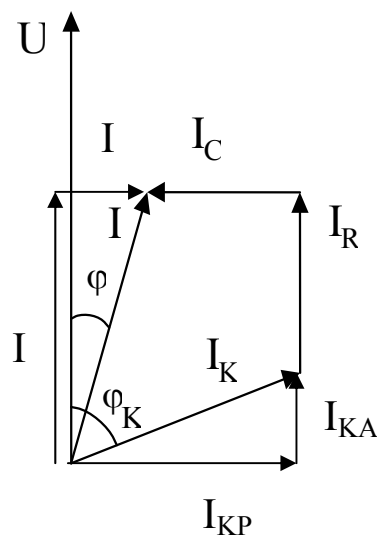


Рис. 2

Следовательно, величина общего тока

$$I = \sqrt{I_A^2 + I_P^2},$$

а угол сдвига фаз между общим током и приложенным напряжением

$$\operatorname{tg} \varphi = I_P / I_A = (I_{KP} - I_C) / (I_R + I_{KA}).$$

Данная векторная диаграмма построена в предположении, что емкостной ток I_C оказался меньше реактивной индуктивной составляющей тока в катушке I_{KP} . Поэтому общий ток отстает по фазе от напряжения. Такая цепь носит активно-индуктивный характер. Если бы емкостной ток I_C был больше реактивной индуктивной составляющей тока в катушке I_{KP} , то ток, потребляемый цепью из сети опережал по фазе приложенное напряжение и цепь носила бы активно-емкостной характер.

При равенстве реактивной индуктивной составляющей тока в катушке I_{KP} и емкостного тока I_C вектор общего тока совпадает по фазе с вектором приложенного напряжения, а его величина определяется только активными составляющими токов $I_A = I_R + I_{KA}$. При этом в цепи наступает явление резонанса токов, так как цепь, содержащая реактивные элементы, ведет себя как цепь с чисто активным сопротивлением. При резонансе токов токи в ветвях с реактивными элементами могут значительно превышать ток, потребляемый от источника питания.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль резисторов, модуль реактивных элементов, модуль измерительный с амперметрами переменного тока, измеритель мощности).

3.2. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением резистора, катушки и конденсатора (рис. 3), установив при этом заданные преподавателем значения сопротивления резистора и емкости конденсатора. Включение отдельных ветвей осуществлять с помощью соответствующих проводников. Схему предъявить для проверки преподавателю.

3.3. Включив электропитание (автоматический выключатель QF модуля питания) исследовать цепь. Для этого измерить напряжение на входе цепи, активную мощность цепи, токи в ветвях и ток, потребляемый от источника питания. Результаты измерений занести в табл. 1.

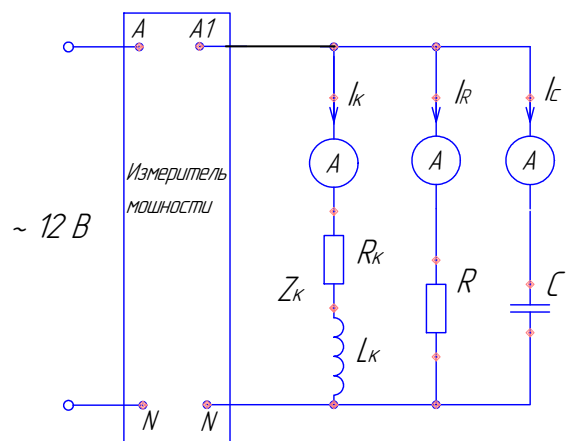


Рис. 3

3.4. Исследовать влияние емкости, включенной параллельно индуктивной катушке, на величину потребляемого от источника питания тока. Для этого подключить параллельно катушке конденсатор C . Установить такое значение емкости, при котором от источника потребляется минимальный ток (резонанс токов). Измерить при этом токи в ветвях и ток, потребляемый из сети. Результаты занести в табл. 1.

Изменить значение емкости конденсатора и измерить токи, напряжение и активную мощность. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Включены ветви	U, В	I, А	I_R , А	I_C , А	I_k , А	P, Вт	φ
R,C					-----		
R, Z_k				-----			
R, Z_k , C,							
Z_k , C1			-----				
Z_k , C2			-----				
Z_k , C3			-----				

3.5. По опытным данным построить в масштабе векторные диаграммы для каждого опыта, определить для каждого случая угол сдвига фаз φ между напряжением и потребляемым током.

3.6. Сделать выводы

- о применении 1-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока.
- о влиянии параллельно включенных потребителей друг на друга,
- о влиянии емкости конденсатора на величину тока, потребляемого из сети.

4. Содержание отчета

- а) наименование работы и цель работы;
- б) схему эксперимента и таблицу полученных результатов;
- в) векторные диаграммы;
- г) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Как при параллельном включении потребителей определить величину тока, потребляемого из сети?
2. С какой целью повышают коэффициент мощности цепи?
3. Как можно определить коэффициент мощности цепи?
4. Как изменятся величина тока, потребляемого из сети, и активная мощность цепи, если параллельно активно-индуктивному потребителю включить конденсатор?
5. Почему уменьшается ток, потребляемый из сети, при подключении параллельно индуктивной катушке конденсатора?
6. Как применяется 1-й закон Кирхгофа в цепях переменного тока?
7. Как построить векторную диаграмму для цепи, содержащей параллельно включенные индуктивную катушку и конденсатор?
8. Что такое «резонанс токов»?

Работа № 6. ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА»

1. Цель работы

Ознакомиться с трехфазными системами, измерением фазных и линейных токов и напряжений. Проверить основные соотношения между токами и напряжениями симметричного и несимметричного трехфазного потребителя. Выяснить роль нейтрального провода в четырехпроводной трехфазной системе. Научиться строить векторные диаграммы напряжений и токов.

2. Пояснения к работе

Трехфазная система переменного тока получила широкое применение, т. к. имеет ряд преимуществ по сравнению с системой однофазного переменного тока. Поэтому чаще всего электрическая энергия вырабатывается, передается и распределяется между потребителями трехфазными системами. Подавляющее большинство электродвигателей является двигателями трехфазного переменного тока.

Чтобы в трехфазной системе можно было одновременно пользоваться двумя различными напряжениями (например, 380 В – для питания электродвигателей и 220 В – для питания электрических ламп и других однофазных потребителей) применяют четырехпроводную систему электроснабжения. Четырехпроводная линия трехфазной системы имеет четыре провода: три линейных, по которым протекают линейные токи I_A , I_B , I_C и один нулевой (нейтральный) провод, предназначенный для поддержания одинаковых значений фазных напряжений на всех трех фазах потребителя. По нулевому проводу может протекать уравнивающий ток I_0 , называемый нулевым или нейтральным током. Такая система соединения обмоток трехфазного генератора и приемников (потребителей) называется «звездой» и показана на рис. 1.

При соединении в звезду фазный ток I_ϕ и линейный ток I_L есть оно и тоже:

$$I_\phi = I_L.$$

Напряжение между линейными проводами, называемое линейным напряжением (например, U_{AB}), оказывается в $\sqrt{3}$ раз больше, чем фазное напряжение источника питания U_A , U_B или U_C :

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi.$$

Если трехфазная система симметричная (все сопротивления и мощности фазных потребителей одинаковы), то по всем трем фазам протекают одинаковые по величине токи, сдвинутые по фазе относительно друг друга на 120° . Ток в нейтральном проводе при этом равен нулю. Напряжения на всех фазах потребителя также отличаются друг от друга только по начальной фазе на 120° (рис. 2).

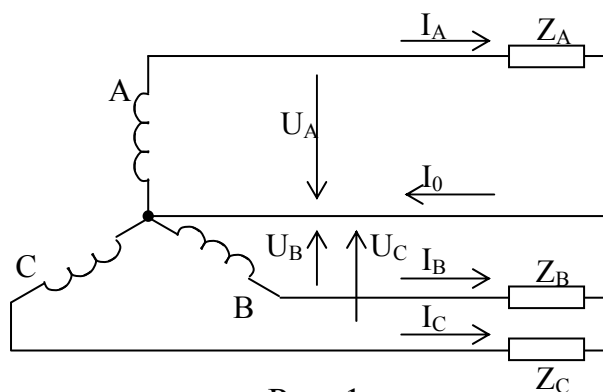
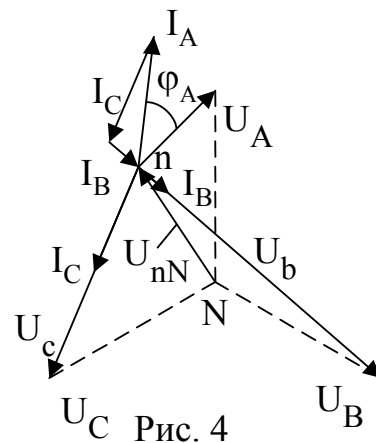
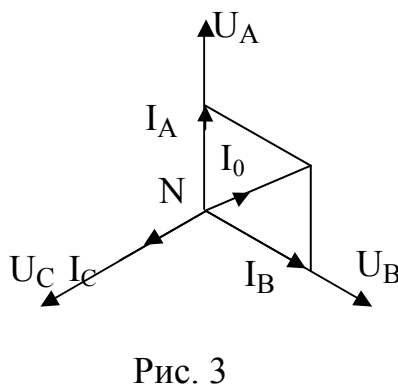
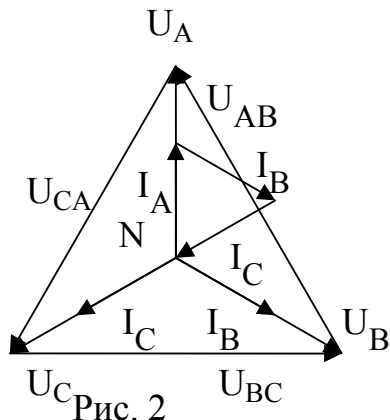


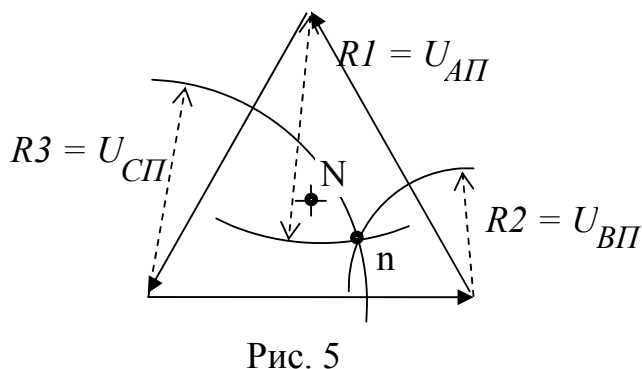
Рис. 1.



При включении в разных фазах различных по мощности потребителей (несимметричная нагрузка), токи каждой фазы (в каждом линейном проводе) отличаются друг от друга не только начальной фазой, но и величиной. По нейтральному проводу при этом протекает ток, вектор которого на основании первого закона Кирхгофа равен геометрической сумме векторов фазных токов (рис. 3)

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = \bar{I}_0.$$

Обрыв нейтрального провода (трехпроводная система) при несимметричной нагрузке приводит к изменению напряжений на всех фазах потребителей и появлению напряжения смещения нейтрали U_{Nn} (рис. 4). Положение точки «n» на векторной диаграмме при измеренных значениях напряжений на фазах потребителей $U_{АП}$, $U_{ВП}$ и $U_{СП}$ может быть определено методом засечек (рис. 5) или рассчитано аналитически.



3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль трехфазного напряжения, модуль трехфазного трансформатора, модуль резисторов, модуль измерительный с амперметрами переменного тока, модуль мультиметров).

3.2. Установить на модуле трехфазного напряжения частоту питающего напряжения 50 Гц (переключатель *SA2*). Включить модуль питания стенда (выключатель *QF1*), модуль трехфазного напряжения (выключатель *SA1* и тумблер *SA3*) и модуль трехфазного трансформатора (выключатель *QF1*). Измерить линейные и фазные напряжения трехфазного источника питания (трехфазного трансформатора) на холостом ходу. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить модуль трехфазного напряжения (кнопка *SB1*, выключатели *SA1* и *SA2*).

Таблица 1

Линейные напряжения			Фазные напряжения			Вычислено		
U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , В	U_A , В	U_B , В	U_C , В	U_L , В	U_Φ , В	U_L / U_Φ

3.3. Собрать электрическую цепь (рис. 6). В качестве нагрузки использовать резисторы модуля резисторов. В качестве источника трехфазного напряжения использовать модуль трехфазного трансформатора.

3.4. Включить в фазах потребителя по указанию преподавателя одинаковые сопротивления резисторов (симметричную нагрузку). Измерить токи, фазные и линейные напряжения при включенном нейтральном проводе. Результаты занести в табл. 2. Проверить соотношение между линейными и фазными напряжениями потребителей.

3.5. Повторить те же измерения при отключенном нейтральном проводе. Результаты занести в табл. 2.

3.6. По указанию преподавателя изменить нагрузку в фазах потребителя так, чтобы в каждой фазе были включены различные сопротивления.

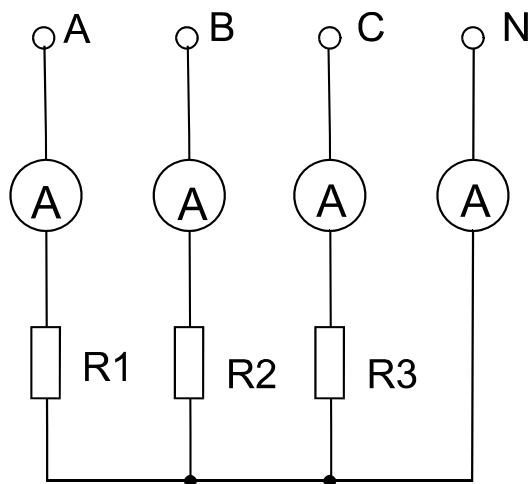


Рис. 6.

Измерить токи, линейные и фазные напряжения в каждой фазе потребителя при наличии нейтрального провода. Результаты записать в табл. 2.

3.7. Отключить нейтральный провод и вновь измерить токи и напряжения. Результаты записать в табл. 2.

3.8. По результатам измерений вычислить активную мощность трехфазной цепи для каждого опыта.

3.9. Для всех проведенных опытов построить в масштабе векторные диаграммы.

3.10. Сравнить влияние нейтрального провода на работу трехфазной системы при симметричной и несимметричной нагрузке.

Таблица 2

Режим нагрузки	Ток нагрузки, А				Напряжение на потребителях, В					
	I_A	I_B	I_C	I_0	Фазные			Линейные		
					$U_{АП}$	$U_{ВП}$	$U_{СП}$	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
Нейтральный провод включен, нагрузка симметричная										
Нейтральный провод выключен, нагрузка симметричная										
Нейтральный провод включен, нагрузка несимметричная										
Нейтральный провод выключен, нагрузка несимметричная										

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) технические данные электроизмерительных приборов;
- в) схему эксперимента с включенными измерительными приборами;
- г) таблицы с результатами эксперимента;
- д) векторные диаграммы для всех проведенных опытов;
- е) вывод о роли нейтрального провода в трехфазной цепи при соединении потребителя по схеме звезда.

5 Контрольные вопросы

1. Какое соединение называется звездой?
2. Каково соотношение между фазным и линейным напряжениями трехфазного источника питания при соединении его обмоток по схеме звезда?
3. Какое соотношение между фазными и линейными токами при соединении в звезду?
4. Как определить величину тока в нейтральном проводе, если известны токи потребителя?
5. Для чего применяют нейтральный провод?
6. К каким зажимам следует подключить вольтметр, чтобы измерить фазное и линейное напряжение?
7. Какая трехфазная нагрузка называется симметричной?
8. Почему при несимметричной нагрузке обрыв нейтрального провода является аварийным режимом?

Работа № 7. ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИК»

1. Цель работы

Исследовать особенности работы трехфазной цепи при соединении симметричного и несимметричного потребителей треугольником, усвоить построение векторных диаграмм по результатам эксперимента.

2. Пояснения к работе

Потребители электрической энергии при питании от трехфазного источника, как и источники электрической энергии, могут быть соединены в треугольник

(рис. 1). Следует помнить, что схема включения обмоток трехфазного генератора не предопределяет схему соединения нагрузки. Так, при соединении фаз генератора в звезду нагрузка может быть соединена в звезду с нейтральным проводом, в звезду без нейтрального провода или в треугольник.

При соединении в треугольник симметричной трехфазной нагрузки линейные напряжения оказываются равными фазным напряжениям $U_\phi = U_L$, а линейные токи в $\sqrt{3}$ раз больше, чем токи в фазах потребителя:

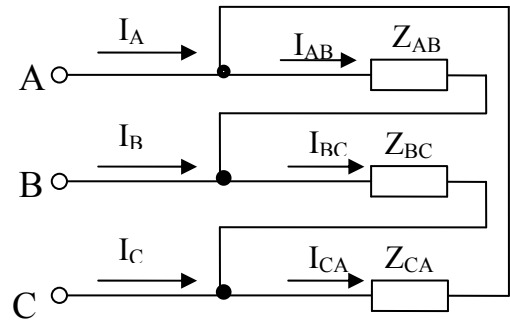
$$I_L = \sqrt{3} I_\phi.$$

При этом все фазные токи равны по величине и отличаются друг от друга по фазе на 120° . То же самое относится и к линейным токам (рис. 2).

При несимметричной нагрузке связь между линейными и фазными токами выражается уравнениями, записанными на основании первого закона Кирхгофа в комплексной или векторной форме:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}, \quad \bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}, \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$

При соединении в треугольник нулевой провод отсутствует, но все фазные потребители в этом случае должны быть рассчитаны на номинальное линейное напряжение.



№

Рис. 1

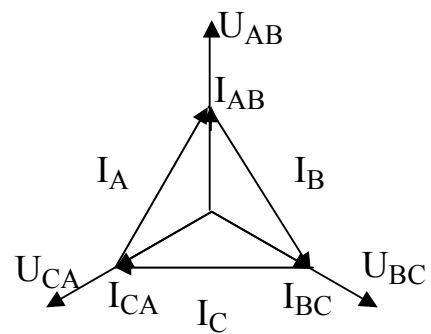


Рис. 2

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модули трехфазного напряжения и трехфазного трансформатора, модуль резисторов, модуль амперметров переменного тока, модуль мультиметров).

Установить на модуле трехфазного напряжения частоту питающего напряжения 50 Гц (переключатель SA2).

3.2. Включить модуль питания стенда (выключатель $QF1$), модуль трехфазного напряжения (выключатель $SA1$ и тумблер $SA3$) и модуль трехфазного трансформатора (выключатель $QF1$).

3.3. Измерить на модуле трехфазного трансформатора линейные напряжения источника питания в режиме холостого хода (при разомкнутой цепи). Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$

3.4. В соответствии с рис. 3. собрать схему соединений потребителей в треугольник. Предъявить схему для проверки. Установить в фазах потребителя по указанию преподавателя одинаковые значения сопротивлений резисторов (симметричную нагрузку). Измерить фазные и линейные токи. Результаты занести в табл. 2.

3.5. Разомкнуть поочередно линейный провод фазы «А» и фазы «В» и провести измерения фазного и линейных токов. Результаты занести в табл. 2.

3.6. Выключить нагрузку в фазе потребителя «АВ» и провести измерения фазного и линейных токов. Результаты занести в табл. 2.

3.7. По указанию преподавателя изменить нагрузку в фазах потребителя так, чтобы в каждой

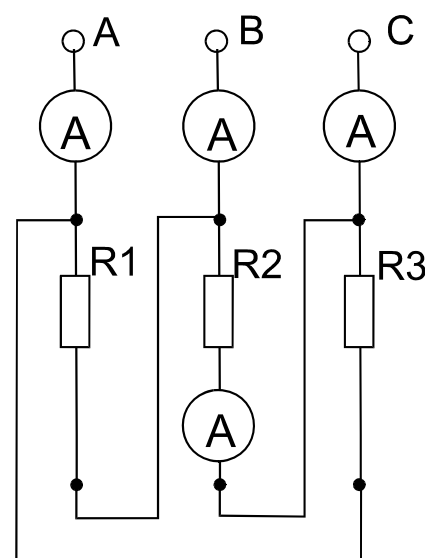


Рис. 3

фазе были включены различные значения сопротивлений. Результаты записать в табл. 2.

Таблица 2

Режим нагрузки	Ток нагрузки, А					
	I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}
Симметричная нагрузка						
Обрыв линейного провода «А»						
Обрыв линейного провода «В»						
Обрыв фазы потребителя «АВ»						
Несимметричная нагрузка						

3.8. Для всех опытов построить в масштабе векторные диаграммы.

3.9. Сравнить результаты измерений линейных и фазных токов при соединении в треугольник при симметричной и несимметричной нагрузке.

3.10. Проанализировать влияние обрыва линейного провода на режим работы потребителей.

3.11. Сравнить режимы работы при включении потребителей в звезду и треугольник при симметричной и несимметричной нагрузке.

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) технические данные электроизмерительных приборов;
- в) схему эксперимента с включенными измерительными приборами;
- г) таблицы с результатами эксперимента;
- д) векторные диаграммы для всех проведенных опытов;
- е) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Каким образом три однофазных потребителя соединяют в треугольник?
2. Куда следует подключать вольтметр, чтобы измерить фазное и линейное напряжения трехфазного потребителя?
3. В каком соотношении находятся фазные и линейные напряжения симметричного потребителя, соединенного в треугольник?
4. Какое соотношение между фазными и линейными токами симметричного потребителя, соединенного в треугольник?
5. Всегда ли справедливы при соединении в треугольник соотношения
$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}, \quad \bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}, \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$
6. Всегда ли при соединении в треугольник справедливо соотношение
$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0?$$
7. Как отразится отключение одной фазы потребителя на режим работы других фаз и на режим работы всей трехфазной цепи, соединенной в треугольник?

Работа № 8. НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1 Цель работы

Экспериментальное получение вольтамперных характеристик нелинейных резистивных элементов, графический расчет нелинейной электрической цепи постоянного тока и экспериментальная проверка результатов расчета.

2 Пояснения к работе

Под нелинейной электрической цепью понимают электрическую цепь, содержащую нелинейные элементы (нелинейные сопротивления, нелинейные индуктивности, нелинейные емкости). Нелинейным элементом называют такой элемент электрической цепи, параметры которого зависят от электрического напряжения, электрического заряда, электрического тока или магнитного потока. Схема замещения цепи постоянного тока содержит только нелинейные резистивные элементы. Нелинейные элементы в отличие от линейных обладают нелинейными вольтамперными характеристиками.

Основной характеристикой нелинейного элемента является его вольтамперная характеристика $U=f(I)$ (рис. 1), из которой видно, что каждому значению постоянного тока (напряжения) соответствует определенное значение постоянного напряжения (тока). У нелинейных цепей различают статическое и динамическое сопротивления. По вольтамперной характеристике определяют статическое сопротивление нелинейного элемента в данной точке А $R_{СТ} = U/I$ и его дифференциальное (динамическое) сопротивление как отношение бесконечно малых приращений напряжения dU и тока dI $R_D = dU/dI$. Динамическое сопротивление пропорционально тангенсу угла наклона β касательной к вольтамперной характеристике в данной точке. Для экспериментального получения вольтамперной характеристики нелинейного элемента необходимо измерить ряд значений постоянного напряжения и постоянного тока в цепи с данным нелинейным элементом (рис. 2).

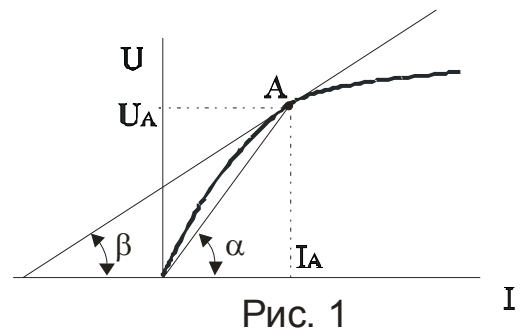


Рис. 1

Математическая модель нелинейной цепи постоянного тока состоит из уравнений Кирхгофа и уравнений характеристик нелинейных резистивных элементов. Так как модель становится нелинейной, то не может быть решена методами линейной алгебры. К нелинейным цепям применимы законы Кирхгофа, хотя методы анализа, основанные на методе наложения (на постоянстве параметров элементов цепи) чаще всего неприменимы. В таких цепях сопротивление и проводимость нелинейного элемента являются нелинейной функцией мгновенного значения тока (напряжения) на этом элементе. Следовательно, они представляют собой переменные величины, а поэтому для расчета мало пригодны.

Так как характеристики нелинейных элементов $U=f(I)$ или $I=f(U)$ часто определяются экспериментально и задаются обычно в виде таблиц или графиков, то широкое применение получили графические (графоаналитические) методы расчета. При этом последовательность операций сохраняется примерно той же,

что и при расчетах линейных цепей, только вместо сложения и вычитания напряжений и токов в соответствии с законами Кирхгофа производится сложение или вычитание абсцисс или ординат соответствующих вольтамперных характеристик. Расчет сводится к построению эквивалентной вольтамперной характеристики цепи. В соответствии с законами Кирхгофа при последовательном соединении элементов характеристики складывают при одинаковых значениях тока, при параллельном соединении – при одинаковых значениях напряжения. В лабораторной работе исследуется электрическая цепь (рис. 3) с двумя нелинейными элементами, одним из которых является лампа накаливания HL , и одним линейным элементом (резистором). Эквивалентная вольтамперная характеристика параллельного соединения $U_{23}=f(I_I)$ при графическом методе расчета получается суммированием вольтамперных характеристик лампы накаливания HL и резистора R при одинаковых значениях напряжения. Вольтамперная характеристика всей цепи $U=f(I_I)$ получается суммированием характеристики нелинейного сопротивления RI и характеристики параллельного соединения $U_{23}=f(I_I)$ при одинаковых значениях тока.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль нелинейных элементов, модуль автотрансформатора, модуль мультиметров, модуль измерительный).

3.2. Собрать электрическую цепь для снятия вольтамперных характеристик элементов цепи (рис. 2) и предъявить её для проверки преподавателю. В качестве регулируемого источника постоянного напряжения использовать выход пониженного постоянного напряжения автотрансформатора = 0...12 В (модуль автотрансформатора).

В качестве амперметра использовать мультиметр в режиме измерения постоянного тока. В качестве вольтметра использовать магнитоэлектрический вольтметр с пределом измерения 15 В модуля измерительного.

Обратить внимание на полярность напряжения на нелинейном элементе $R1$.

3.3. Снять

вольтамперную характеристику нелинейного элемента RI . Для этого установить регулятор напряжения автотрансформатора в крайнее левое положение, включить последовательно модули питания (выключатель $QF1$), мультиметров и автотрансформатора. Увеличивая плавно напряжение питания провести необходимые измерения при изменении тока от 0 до 80...100 мА. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить электропитание стенда.

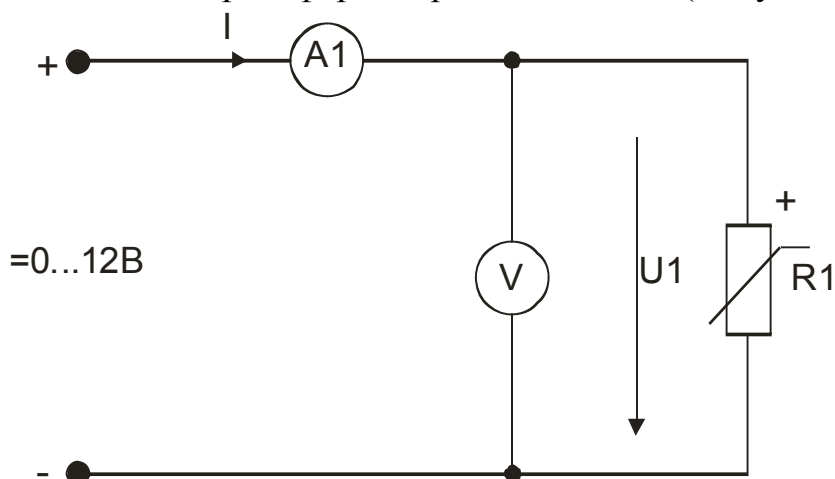


Рис. 2

Таблица 1

U, В	0									
I, А	0									

3.4. Собрать цепь с последовательным соединением лампы накаливания *HL* и резистора *R2*. Снять вольтамперную характеристику лампы накаливания и резистора *R2*. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

I, А	0									
U _л , В	0									
U _Р , В	0									

3.6. Собрать разветвленную электрическую цепь по рис. 3 и предъявить её для проверки преподавателю.

3.7. Включить электропитание стенда и снять вольтамперную характеристику всей цепи $U_{эксн}=f(I_1)$. Выполнять аналогично п. 3.3. Результаты измерений занести в табл. 4. Выключить электропитание.

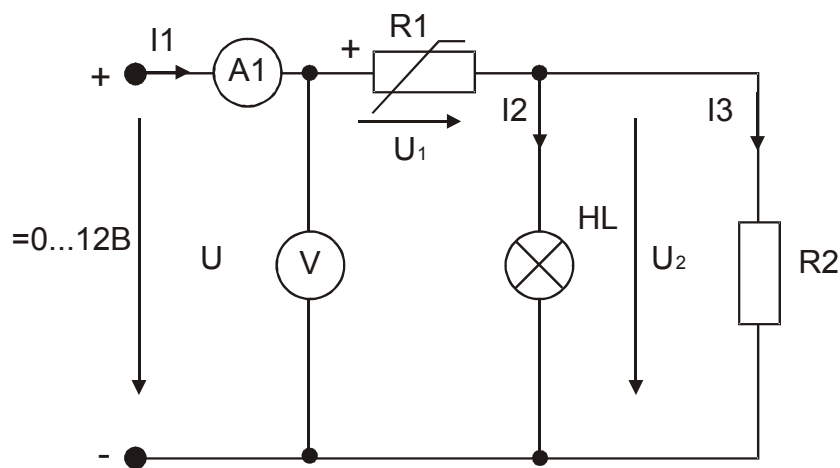


Рис. 3

Таблица 4

U, В	0									
I ₁ , А	0									

3.8. Построить по экспериментальным данным вольтамперные характеристики отдельных элементов цепи.

3.9. Записать уравнения законов Кирхгофа для исследуемой цепи. Используя результаты эксперимента, построить расчетную вольтамперную характеристику всей цепи $U_{расч}=f(I_1)$. Здесь же нарисовать полученную экспериментальную вольтамперную характеристику цепи $U_{эксн}=f(I_1)$ и сравнить их.

3.10. Для указанного преподавателем значения входного напряжения выполнить графический расчет токов ветвей и напряжений на отдельных участках цепи по рис. 3. Результаты расчета занести в табл. 5.

Таблица 5

	U, В	U ₁ , В	U ₂ , В	I ₁ , А	I ₂ , А	I ₃ =I ₁ -I ₂ , А
Расчет						
Эксперимент						

3.11. Для проверки расчета нелинейной цепи собрать электрическую цепь по рис. 4 и предъявить её для проверки преподавателю. В качестве амперметров

использовать мультиметры в режиме измерения постоянного тока. После проверки схемы включить электропитание и установить заданное значение входного напряжения U . Измерить токи I_1 и I_2 , стрелочным вольтметром измерить напряжения U_1 и U_2 на отдельных участках цепи. Определить величину тока I_3 . Результаты занести в табл. 5.

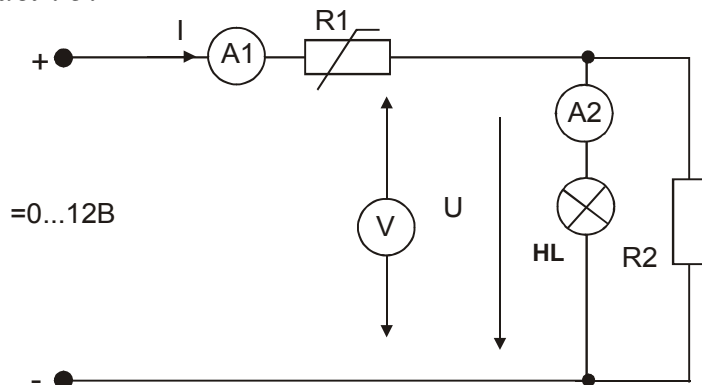


Рис 4

3.12. Сделать вывод об особенностях применения законов Кирхгофа в нелинейной цепи постоянного тока.

3.13. Рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления при указанном преподавателем значении напряжения.

6. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы экспериментов и таблицы с результатами измерений;
- в) расчетные и экспериментальные вольтамперные характеристики;
- г) сравнение результатов расчета с экспериментальными данными;
- д) выводы.

7. Контрольные вопросы

- 5.1. Что такое «нелинейный элемент» в электрической цепи?
- 5.2. Привести примеры нелинейных элементов электрических цепей и их вольтамперных характеристик.
- 5.3. Почему для нелинейной цепи удобен графический способ анализа?
- 5.4. Справедливы ли для нелинейных цепей законы Кирхгофа?
- 5.5. Как построить вольтамперную характеристику последовательного соединения нелинейных элементов?
- 5.6. Как построить вольтамперную характеристику параллельного соединения нелинейных элементов?
- 5.7. Как определяется статическое сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для разных точек вольтамперной характеристики нелинейного элемента?
- 5.8. Как определяется динамическое сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для разных точек вольтамперной характеристики нелинейного элемента?

Работа № 9 НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы

Экспериментальное исследование вольтамперных характеристик катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником и конденсатора. Изучение формы кривой тока в катушке с сердечником. Сравнение экспериментальных результатов с расчетными данными. Знакомство с работой двустороннего ограничителя уровня напряжения.

2. Пояснения к работе

Важным элементом конструкции различных электрических машин и аппаратов, устройств электроавтоматики является катушка индуктивности. При протекании тока по виткам катушки создается магнитное поле, интенсивность которого характеризуется магнитной индукцией B и магнитным потоком Φ , который пропорционален намагничивающей (магнитодвижущей) силе $F = I\omega$, где I – ток катушки, ω – число её витков. Зависимость $\Phi(I)$ при отсутствии ферромагнитного магнитопровода (сердечника) является линейной.

При наличии сердечника магнитный поток, создаваемый такой катушкой при прочих равных условиях значительно возрастает, так как в этом случае магнитный поток создается не только проводниками с током (источником внешнего магнитного поля), но и соответствующим ферромагнитным веществом магнитопровода (источником внутреннего магнитного поля).

Магнитная индукция B катушки индуктивности связана с напряженностью H магнитного поля и магнитной проницаемостью μ известным соотношением $B = \mu H$, магнитный поток $\Phi = Bs = \mu Hs$, где s – поперечное сечение катушки.

Отсюда следует, что магнитный поток пропорционален магнитной проницаемости среды μ , которая для ферромагнитных материалов значительно больше, чем магнитная проницаемость других материалов. Поэтому для уменьшения намагничивающей силы F , а следовательно, и для уменьшения тока, необходимого для создания требуемого магнитного потока, катушки индуктивности снабжаются магнитопроводом (сердечником) из ферромагнитного материала, чаще всего из электротехнической стали.

Так как зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов $\mu(H)$ является нелинейной (рис. 1), то и зависимость $\Phi(H)$ или $B(H)$ при наличии магнитопровода оказывается тоже нелинейной. Зависимость $B(H)$ – кривая намагничивания – является одной из важнейших характеристик ферромагнитных материалов (рис. 2). Кривая, проходящая через начало координат, является основной кривой намагничивания. Она снимается при одностороннем намагничивании не намагниченого материала.

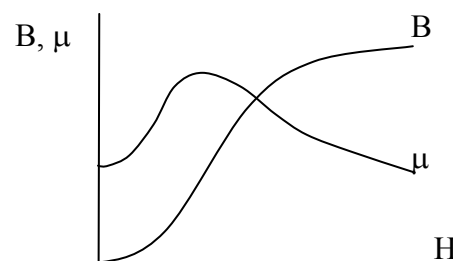


Рис. 1.

При питании катушки переменным током ферромагнитный магнитопровод из-за переменного магнитного потока перемагничивается циклически с частотой тока по кривой гистерезиса (рис. 2). В процессе циклического перемагничивания

за несколько полупериодов переменного тока устанавливается замкнутая симметричная петля гистерезиса.

На циклическое перемагничивание магнитопровода затрачивается мощность, выделяемая в виде теплоты, которая относится к потерям мощности в магнитопроводе. Потери мощности в магнитопроводе, называемые часто потерями мощности в стали P_{CT} , включают в себя потери на гистерезис P_H и потери от вихревых токов P_{BT} , наводимых переменным магнитным потоком в металле магнитопровода, : $P_{CT} = P_H + P_{BT}$.

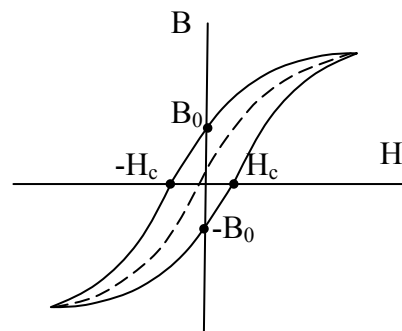


Рис. 2.

Для уменьшения потерь мощности на гистерезис в качестве материала для магнитопровода используют ферромагнитные материалы с узкой петлей гистерезиса. Уменьшение потерь мощности на вихревые токи достигается применением для магнитопровода металлов с большим удельным электрическим сопротивлением за счет повышенного содержания кремния в металле. При этом магнитопровод собирается из тонких электрически изолированных друг от друга пластин, что способствует уменьшению наводимых в каждой пластине вихревых токов и снижению потерь мощности от этих токов.

При питании синусоидальным напряжением ток в катушке с ферромагнитным сердечником искажает свою форму и является несинусоидальным во времени. На рис. 3 показано построение кривой тока в катушке с ферромагнитным сердечником с учетом магнитного гистерезиса. Из рисунка видно, что начальные фазы магнитного потока и тока не совпадают (угол сдвига δ). В связи с этим первая гармоника тока (или эквивалентный ток) отстает от приложенного напряжения на угол $\varphi < 90^\circ$. Наличие сдвига по фазе между напряжением и током меньшего, чем 90° указывает на то, что активная мощность в цепи не равна нулю даже если активное сопротивление обмотки катушки равно нулю. Поэтому ток катушки из-за потерь на гистерезис имеет активную составляющую I_A , а средняя мощность за период не равна нулю. Эта активная мощность характеризует расход энергии на перемагничивание ферромагнитного сердечника.

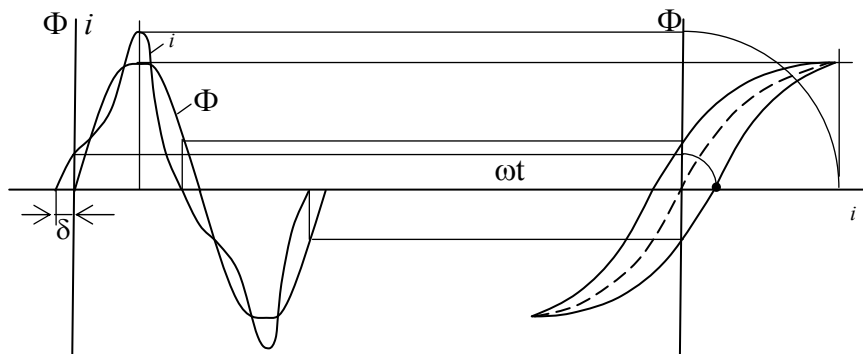


Рис. 3.

При наличии несинусоидальных токов для упрощения расчетов обычно переходят к эквивалентному синусоидальному току $I_{ЭК}$, имеющему одинаковое с соответствующим несинусоидальным током действующее значение при одинаковой частоте и развивающему одинаковую с ним активную мощность при одинаковом значении коэффициента мощности

$$I = \sqrt{1/T \int_0^T i^2 dt} = I_{ЭК} = I_{мЭК} / \sqrt{2};$$

$$\cos \varphi = P/UI = \cos \varphi_{ЭК} = P/U I_{ЭК}$$

Полное сопротивление катушки индуктивности с магнитопроводом при расчетах находят по закону Ома

$$Z_{ЭК} = U/I.$$

Эквивалентное активное сопротивление катушки с магнитопроводом определяют при этом по значению активной мощности P , потребляемой катушкой из питающей сети, и её току или по значению потерь мощности в сердечнике $P_{СТ}$ и активному сопротивлению R проводов катушки

$$R_{ЭК} = P/I^2 = P_{СТ}/I^2 + R.$$

Эквивалентное индуктивное сопротивление катушки

$$X_{ЭК} = \sqrt{Z_{ЭК}^2 - R_{ЭК}^2}.$$

При этом индуктивность катушки $L = X_{ЭК}/\omega = X/2\pi f$.

При увеличении амплитуды напряжения на катушке индуктивности с ферромагнитным сердечником амплитуда и действующее значение тока в ней будут возрастать быстрее. В результате вольтамперная характеристика катушки с ферромагнитным сердечником оказывается нелинейной (рис. 4). По форме она повторяет кривую намагничивания сердечника $B(H)$.

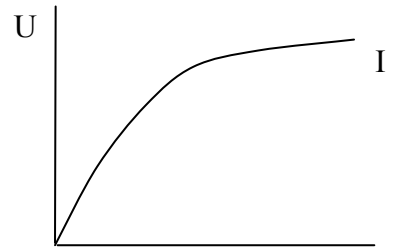


Рис. 4.

В цепях, содержащих катушку с ферромагнитным сердечником и конденсатор, резонансные явления, связанные с нелинейным характером индуктивности, называются феррорезонансом. В отличие от линейной цепи феррорезонанс может наступить в такой цепи при изменении тока в цепи или приложенного напряжения без какой либо регулировки катушки или конденсатора. На рис. 5 показана вольтамперная характеристика последовательной цепи, в которой возможен феррорезонанс напряжений. Вольтамперная характеристика емкости (2) пересекает вольтамперную характеристику катушки (1). Точка пересечения А является точкой резонанса. В этой точке U_L и U_C одинаковы, а их разность равна нулю. При непрерывном увеличении напряжения источника ток плавно растет до I_2 , затем скачком увеличивается до I_4 и далее плавно растет. При уменьшении напряжения ток плавно уменьшается до I_3 , затем скачком до I_1 и снова плавно падает.

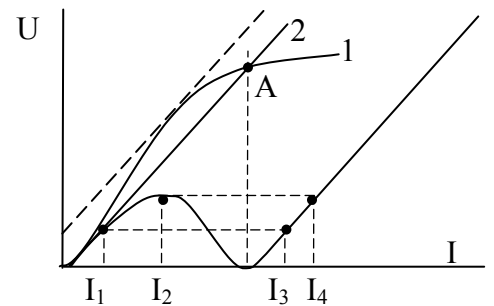


Рис. 5.

Скачкообразное изменение тока сопровождается изменением на 180° фазы тока по отношению к напряжению (опрокидывание фазы). С увеличением активного сопротивления R падающий участок на вольтамперной характеристике исчезает.

Явление резкого изменения тока в цепи при незначительных изменениях напряжения на входе цепи иногда называют триггерным эффектом в последовательной феррорезонансной цепи.

При напряжениях источника, больших напряжения опрокидывания фазы, напряжение на катушке изменяется мало, что связано с переходом по характеристике намагничивания в область магнитного насыщения. Это используется в практике для стабилизации напряжения.

Ограничители амплитуды – это устройства, у которых выходное напряжение изменяется пропорционально входному напряжению до некоторого значения, называемого уровнем ограничения. После этого значение выходного напряжения не зависит от величины входного напряжения и остается постоянным (рис. 6). В низкочастотных устройствах часто используют ограничители на стабилитронах (рис. 7). Вольтамперная характеристика двуханодного стабилитрона показана на рис. 8. С помощью этих устройств легко формировать трапецеидальное напряжение из синусоидального напряжения (рис. 6). Если амплитуда $U_{вх} \gg U_{ст}$ можно получить напряжение, близкое по форме к прямоугольным импульсам.

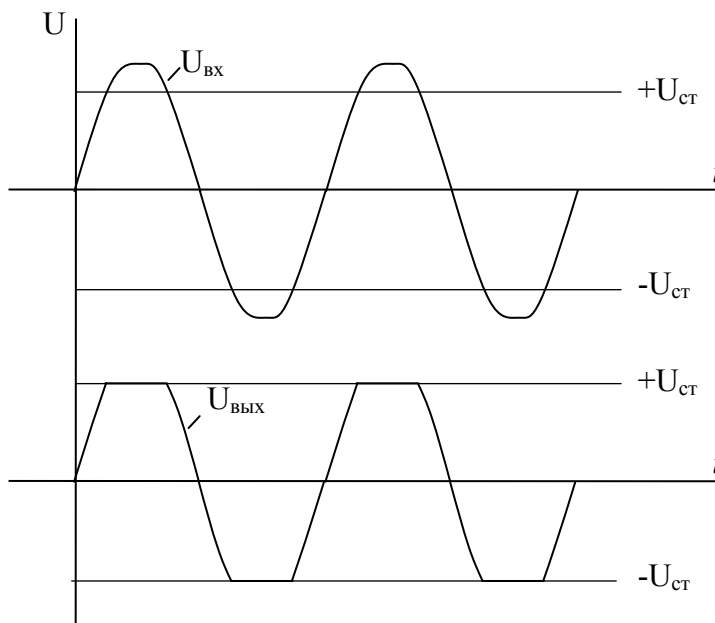


Рис. 6.

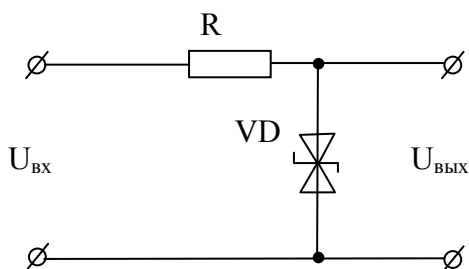


Рис. 7.

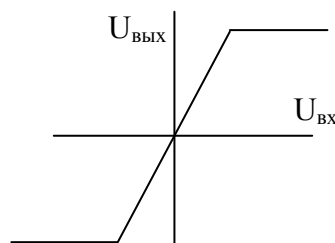


Рис. 8.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль нелинейных элементов, модуль автотрансформатора, модуль реактивных элементов, модуль мультиметров, модуль измерительный, осциллограф).

3.2. Для снятия вольтамперной характеристики катушки с сердечником собрать электрическую цепь по рис. 9. В качестве амперметра и вольтметра использовать мультиметры в соответствующих режимах работы или стрелочные приборы. В качестве регулируемого источника переменного напряжения использовать выход пониженного переменного напряжения

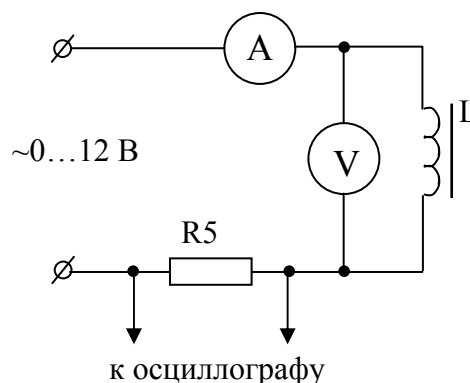


Рис. 9.

автотрансформатора $\sim 0 \dots 12$ В (модуль автотрансформатора). Подключить параллельно добавочному резистору $R5$ выводы осциллографа. Изменяя величину выходного напряжения автотрансформатора от нуля, снять вольтамперную характеристику катушки с ферромагнитным сердечником. При проведении опытов не допускать превышения тока свыше 1 А. Результаты измерений занести в табл. 1. При проведении измерений наблюдать с помощью осциллографа форму кривой тока в цепи. Зарисовать вид кривой тока. Выключить электропитание стенда.

Таблица 1

$U_K, \text{В}$	0	2	4	6	8	10	12
$I, \text{А}$							

3.3. Для снятия вольтамперной характеристики конденсатора подключить к выходу автотрансформатора вместо катушки с сердечником батарею конденсаторов (модуль реактивных элементов). Величину емкости батареи конденсаторов установить по указанию преподавателя (например, 250 мкФ). Снять вольтамперную характеристику конденсатора, изменяя выходное напряжение автотрансформатора от нуля. Результаты измерений занести в табл. 2

Таблица 2

$U_C, \text{В}$	0	2	4	6	8	10	12
$I, \text{А}$							

3.4. Используя полученные экспериментальные результаты, построить в одной системе координат вольтамперные характеристики катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора. Для случая последовательного соединения катушки с ферромагнитным сердечником и исследованного конденсатора построить вольтамперную характеристику такой цепи и по ней определить величину напряжения, при котором будет наблюдаться триггерный эффект.

3.5. Собрать электрическую цепь с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора (рис. 10). Плавно изменяя величину входного напряжения, снять вольтамперную характеристику всей цепи при увеличении и уменьшении входного напряжения. Обратить внимание на скачок тока при увеличении и уменьшении напряжения. Результаты измерений занести в табл. 3

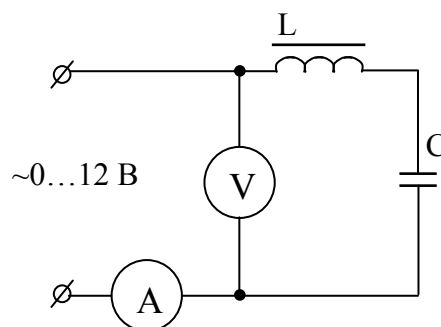


Рис. 10.

Таблица 3

$U_{увел}, \text{В}$	0	2	4	6	8	10	12
$I_{увел}, \text{А}$							
$U_{уменьш}, \text{В}$	12	10	8	6	4	2	0
$I_{уменьш}, \text{А}$							

3.6. По экспериментальным результатам построить ВАХ цепи с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора. Сравнить полученную характеристику с расчетной характеристикой.

3.7. Ознакомиться с работой ограничителя уровня напряжения. Для этого собрать схему по рис. 11. Подключить параллельно двуханодному стабилитрону VD3 осциллограф.

В качестве амперметра использовать мультиметр в режиме измерения переменного тока. Плавно увеличивая входное напряжение наблюдать по осциллографу форму выходного напряжения. Измерить осциллографом амплитуду выходного напряжения и сравнить ее с паспортными данными

стабилитрона Д815Г. Зарисовать осциллограммы наибольшего входного и соответствующего выходного напряжений.

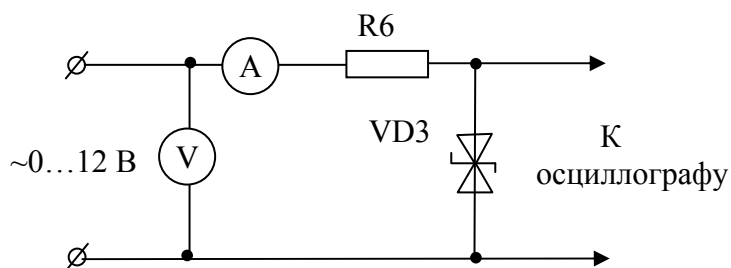


Рис. 11.

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы экспериментов и таблицы с результатами измерений;
- в) расчетные и экспериментальные вольтамперные характеристики;
- г) осциллограммы напряжений и токов;
- д) сравнение результатов расчета с экспериментальными данными;
- е) выводы о свойствах исследованных цепей.

5. Контрольные вопросы

1. Объяснить назначение ферромагнитного сердечника катушки индуктивности.

2. Пояснить влияние сердечника на величину индуктивности катушки.

3. Как изменится вольтамперная характеристика катушки индуктивности при наличии воздушного зазора в сердечнике?

4. Почему сердечник часто выполняется из изолированных друг от друга пластин электротехнической стали?

5. Объяснить причину искажения синусоидальной формы тока при питании катушки индуктивности синусоидальным напряжением.

6. Как определить параметры схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником?

7. Каким образом в цепи с последовательным соединением линейной катушки индуктивности и конденсатора можно обеспечить возникновение резонанса напряжений?

8. В чем особенности явления феррорезонанса напряжений?

9. Почему с увеличением емкости конденсатора возможно изменение величины питающего напряжения, при котором происходит триггерный эффект?

10. Каково практическое применение феррорезонансных явлений?

11. Объяснить причину изменения формы выходного напряжения ограничителя уровня напряжения.

