Научно-производственное предприятие
«Учебная техника – Профи»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Методические указания
к проведению лабораторных работ

Челябинск
2011

Бородянко В.Н., Электрические цепи. Методические указания к проведению лабораторных работ. – Челябинск: Учтех-Профи, 2011.

Методические указания предназначены для студентов средних и высших учебных заведений, в которых предусмотрено изучение курса «Электротехника и 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	**Краткие теоретические сведения**	**8**
2.1.	Измерения в электрических цепях	8
2.2.	Электрические цепи постоянного тока	11
2.3.	Электрические цепи переменного тока	14
2.4.	Трехфазные электрические цепи переменного тока	24
2.5.	Нелинейные цепи переменного тока	26
3	**Методические указания к проведению лабораторных работ**	**30**
	Работа № 1 Электроизмерительные приборы и измерения в электрических цепях	30
	Работа № 2. Простейшие линейные электрические цепи постоянного тока	32
	Работа № 3. Смешанное соединение элементов в электрической цепи постоянного тока	35
	Работа № 4. Электрическая цепь постоянного тока с двумя источниками электропитания	38
	Работа № 5. Нелинейная цепь постоянного тока с последовательным соединением элементов	41
	Работа № 6. Разветвленная нелинейная электрическая цепь постоянного тока	43
	Работа № 7. Экспериментальное определение параметров элементов в цепях постоянного тока	47
	Работа № 8. Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением элементов	50
	Работа № 9. Электрическая цепь переменного тока с параллельным соединением элементов. Повышение коэффициента мощности электроустановок	53
	Работа № 10. Частотные свойства электрических цепей	57
	Работа № 11. Нелинейная цепь переменного тока	60
	Работа № 12. Исследование трехфазной цепи при соединении потребителей по схеме «звезда»	64
	Работа № 13. Исследование трехфазной цепи при соединении потребителей по схеме «треугольник»	68

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 приступать 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 $10^{\pm n}$, $2*10^{\pm n}$ или $5*10^{\pm n}$ 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. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. ИЗМЕРЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

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 измерений токов и напряжений в цепях переменного тока применяются также приборы выпрямительной системы. Такие приборы содержат выпрямительный преобразователь и магнитоэлектрический измерительный механизм. Они имеют более линейную шкалу, чем приборы электромагнитной системы и достаточно широкий частотный диапазон.

Для практического использования стрелочного 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) $A_{НОМ}$:

$$\gamma_{ПР} = 100\ \Delta A\ /A_{НОМ}\%.$$

Промышленность в соответствии с ГОСТ выпускает приборы с различными классами точности (0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,5; 2,5; 4,0).

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

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

Расчетную относительную погрешность измерения в любой точке шкалы прибора можно определить, полагая, что его допустимая абсолютная погрешность ΔА известна и постоянна:

$$\gamma_{ИЗМ} = 100\ \Delta A/A_{ИЗМ},$$

где $A_{ИЗМ}$ – условное измеренное значение величины, задаваемое в пределах шкалы прибора от минимального значения до номинального значения данного прибора. Обратить внимание на значение относительной погрешности измерения, соответствующее предельному значению измеряемой величины, и сравнить его с классом точности прибора.

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.

В табл. 1 приведены некоторые условные обозначения, приводимые на лицевых панелях стрелочных измерительных приборов, определяющие их свойства и условия эксплуатации.

При проведении измерений в электрических цепях широкое применение получили цифровые измерительные приборы, например мультиметры – комбинированные цифровые измерительные приборы, позволяющие измерять постоянное и переменное напряжение, постоянный и переменный ток, сопротивления, проверять диоды и транзисторы. 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 и светодиодные индикаторы. В лабораторном стенде используются цифровые приборы для измерения постоянных и переменных токов, а также цифровой измеритель мощности. Для переключения режима работы цифровых амперметров стенда PA1, PA2, PA3 и PA4 на его передней панели установлен тумблер, который для измерения постоянного тока следует установить в позицию «=», для измерения переменных токов – в позицию «~». Для измерения постоянного тока входная клемма цифрового амперметра выделена красным цветом.

Цифровой измеритель мощности предназначен для измерения параметров электрической цепи:

– действующего значения напряжения U (True RMS) в диапазоне 0…30 В;

– действующего значения тока I (True RMS) в диапазоне 0…300 мА;

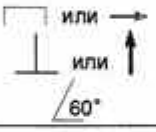
– активной мощности P в диапазоне 0…600 Вт;

– частоты f в диапазоне 35…400 Гц;

– cos φ;

– угла сдвига фаз φ (Fi) между током и напряжением.

Таблица 1

Условное графическое обозначение	Содержание условного обозначения
A, V, W, Ω, Hz, cosφ, F, H	Наименование измеряемой величины (ампер, вольт, ватт, ом, герц, коэффициент мощности, фарада, генри)
	Магнитоэлектрический измерительный механизм
	Электромагнитный измерительный механизм
	Магнитоэлектрический измерительный механизм с выпрямителем
0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,5; 2,5; 4,0	Класс точности прибора
	Рабочее положение шкалы прибора: горизонтальное; вертикальное; под углом, например 60°
— ~ ⩫ ≋	Прибор предназначен для работы в цепи постоянного тока; переменного тока; постоянного и переменного; в трехфазной цепи переменного тока
А Б B_1; B_2; B_3	А (или отсутствие буквы) – прибор для сухих отапливаемых помещений с температурой +10°С …+35°С и влажности до 80% при 30°С; Б – прибор для закрытых не отапливаемых помещений с температурой -30°С …+40°С и влажности до 90% при 30°С; В – приборы для полевых и морских условий: B_1 – при температуре -40°С … +50°С и B_2 – при температуре -50°С … +60°С и влажности до 95% при 35°С; B_3 – при температуре -40°С … +50°С и влажности до 98% при 40°С
	Измерительная цепь прибора изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2 кВ
30 – 200 Hz	Рабочий частотный диапазон прибора

Прибор содержит:

– клеммы подачи входного измеряемого сигнала (генератора): клемму «Вх» и общую клемму, клеммы подключения потребителя (нагрузки): клемму «Вых» и общую клемму. Шунт для измерения тока нагрузки подключен между клеммами «Вх» и «Вых»;

– жидкокристаллический четырехстрочный индикатор для вывода информации;

– кнопку «f/cosφ/φ» изменения вывода информации в четвертой строке индикатора (соответственно, частоты, коэффициента мощности cosφ или угла сдвига фаз Fi между током и напряжением).

С задней стороны прибора установлены розетка для подключения питания сети и колодка предохранителя.

С помощью кнопки «f/cosφ/φ» можно изменять вывод информации в четвертой строке индикатора. Для вывода требуемого параметра в четвертой строке индикатора кнопку необходимо нажать на 1…2 секунды.

Изменения схемы подключения прибора и лабораторной установки выполнять при выключенном питании прибора. В противном случае возможны изменения показаний прибора, а также возникновение нарушений в работе индикатора прибора.

2.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

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 $R_Э$ последовательной цепи постоянного тока равно сумме сопротивлений отдельных участков: $R_Э = R_1 + R_2 + \ldots$.

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:

$$U = U_1 + U_2 + \ldots .$$

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

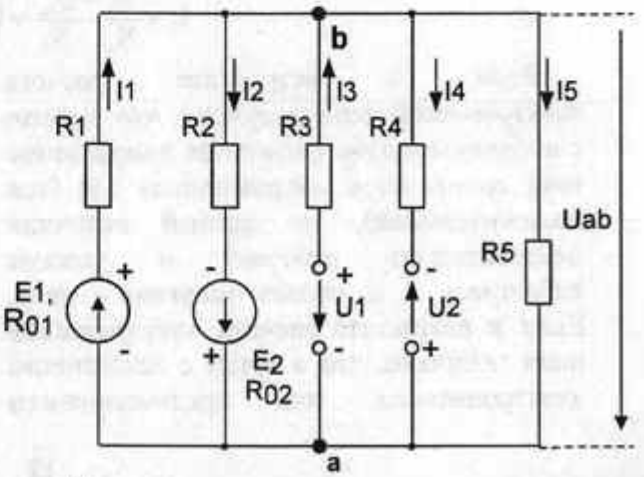


Рис. 1

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

Проводимость параллельного соединения равна сумме проводимостей отдельных участков: $1/R_Э = 1/R_1 + 1/R_2 + \ldots$.

Анализ любой электрической цепи может быть проведен методом непосредственного применения законов Кирхгофа. Если электрическая цепь состоит только из параллельных ветвей, то есть имеет два узла (рис. 1), то её анализ целесообразно проводить методом узлового напряжения, применение которого является менее трудоемким и позволяет избежать решения системы уравнений. Метод узлового напряжения рекомендуется использовать и в тех случаях, когда сложную электрическую схему можно упростить, заменяя последовательно и параллельно соединенные резисторы эквивалентными, используя при необходимости преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду.

Применение данного метода состоит из двух этапов. На первом этапе определяется величина узлового напряжения Uab (рис. 1):

$$U_{ab} = \frac{E_1 g_1 - E_2 g_2 + U_1 g_3 - U_2 g_4}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5},$$

где $g_1 \ldots g_5$ – проводимости соответствующих ветвей цепи.

При записи этого соотношения следует задаться положительным направлением узлового напряжения U_{ab}. Со знаком «+» берутся эдс, направленные между точками a и b *встречно* напряжению U_{ab}, и напряжения ветвей, направленные *согласно* с U_{ab}.

При анализе электрических цепей методом узлового напряжения рекомендуется выбирать положительные направления токов после определения узлового напряжения. После определения величины напряжения U_{ab} находят значения токов в ветвях, составляя уравнения по второму закону Кирхгофа. При этом каждый контур должен включать в свой состав ветвь с искомым током и узловое напряжение. Например, уравнение по второму закону Кирхгофа для определения тока в первой ветви будет иметь вид:

$$E_1 = I_1(R_{01} + R_1) + U_{ab}.$$

Откуда

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_{01} + R_1} = (E_1 - U_{ab})g_1.$$

Если в результате расчета электрической цепи получено, что в ветви с источником электропитания направление тока совпадает с направлением эдс (ток положительный), то данный источник действительно работает в режиме источника, т. е. отдает энергию в цепь. Если в результате расчета электрической цепи получено, что в ветви с источником электропитания ток противоположен

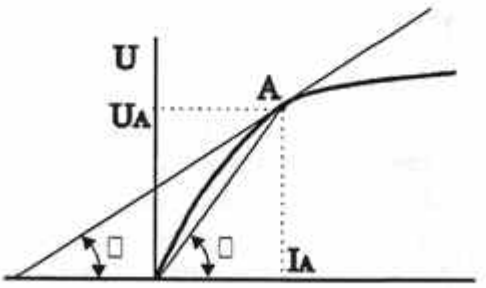


Рис. 2

направлению эдс (ток отрицательный), то данный источник в действительности работает в режиме потребителя.

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 отличии от линейных обладают нелинейными вольтамперными характеристиками.

Основной характеристикой нелинейного элемента является его вольтамперная характеристика $U=f(I)$ (рис. 2), из которой видно, что каждому значению постоянного тока (напряжения) соответствует определенное значение постоянного напряжения (тока). У нелинейных элементов различают статическое и динамическое сопротивления. По вольтамперной характеристике определяют статическое сопротивление нелинейного элемента в данной точке А $R_{CT}=U/I$ и его дифференциальное (динамическое) сопротивление как отношение бесконечно малых приращений напряжения dU и тока dI $R_{Д}=dU/dI$. 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.

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 малопригодны.

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.

2.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

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 $dw = ri^2dt$.

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. Поэтому 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 эдс самоиндукции $e_L = - w\, d\Phi/dt = - Ldi/dt$. 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 эдс самоиндукции и тем больше индуктивное сопротивление $X_L = \omega L = 2\pi f L$. Величина $\omega = 2\pi f$ называется угловой (циклической) 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 эдс наступают при максимальной скорости изменения тока в катушке, то есть при прохождении тока через нуль. Поэтому на участке цепи с индуктивностью эдс самоиндукции по времени отстает от тока на четверть периода или на $\pi/2$ электрических радиана. Напряжение на индуктивности, будучи противоположным э.д.с., наоборот, опережает ток на четверть периода или на $\pi/2$ электрических радиана. Если по катушке проходит ток, мгновенное значение которого $i(t)=I_M \sin(2\pi ft)$, то мгновенное значение напряжения на индуктивности

$$u_L(t)=U_M \sin(2\pi ft + \pi/2) = X_L I_M \sin(2\pi ft + \pi/2).$$

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. 3), 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. 5): $tg\varphi = X_L / R$. Для такого участка электрической цепи уравнение на основании второго закона Кирхгофа имеет вид:

$$u = u_R + u_L = Ri + Ldi/dt.$$

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 $u_L = Ldi/dt$, называемое реактивной составляющей приложенного напряжения. Фазовые соотношения между этими составляющими,

приложенным напряжением и протекаемым током обычно иллюстрируются векторной диаграммой для их действующих значений (рис. 4).

Из векторной диаграммы видно, что

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

где $Z = U_M / I_M = U / I = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ – полное электрическое сопротивление реальной катушки. Из треугольника сопротивлений (рис. 5) 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 $I = U / Z$.

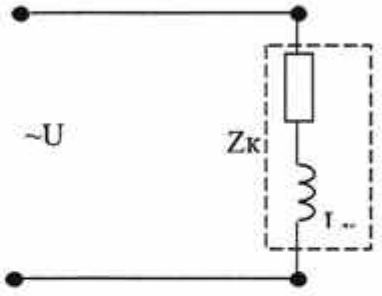


Рис. 3

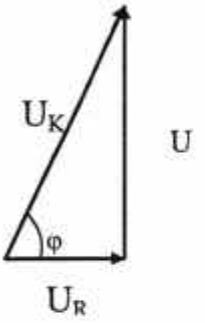


Рис. 4

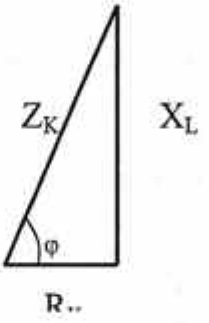


Рис. 5

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:

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

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 емкостной ток.

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. 6.

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.

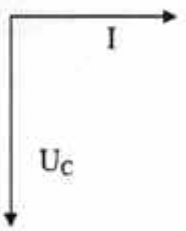


Рис. 6

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 (BA), равна произведению действующего значения тока I на действующее значение напряжения U:

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

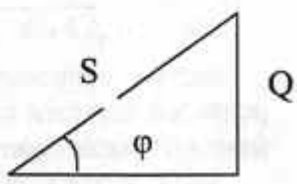


Рис. 7

Соотношения этих мощностей иллюстрируются треугольником мощностей (рис. 7).

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. 8) 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. 9).

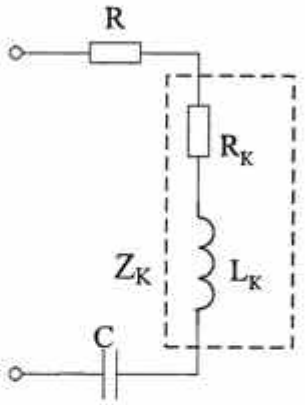


Рис. 8

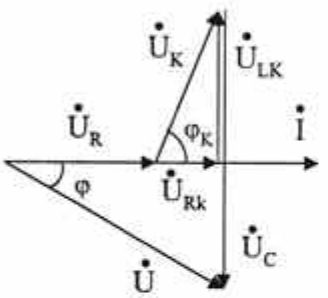


Рис. 9

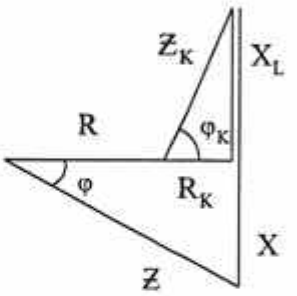


Рис. 10

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

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

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. 10).

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

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

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 реактивное 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 активным эквивалентным сопротивлением цепи $R_Э = R + R_K$.

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

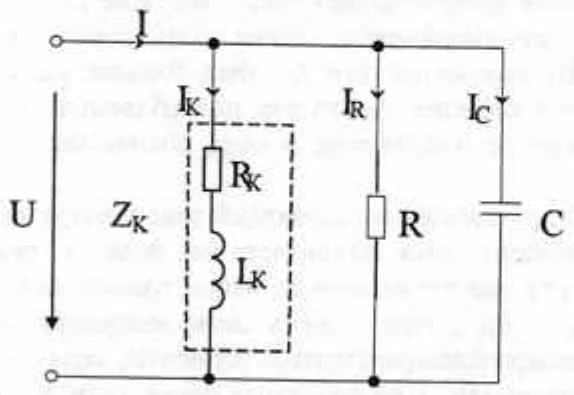


Рис. 11

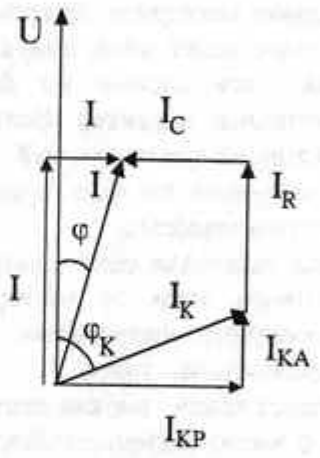


Рис. 12

резонансная частота цепи.

При параллельном соединении элементов получают разветвленную цепь (рис. 11).

При параллельном соединении элементов токи в отдельных ветвях зависят от величины приложенного напряжения и полного сопротивления каждой ветви. При этом ток в ветви с резистором I_R совпадает по фазе с напряжением, ток в ветви с индуктивной катушкой I_K отстает по фазе от напряжения на угол φ, зависящий от активного и реактивного сопротивления реальной катушки индуктивности. Ток в ветви с конденсатором I_C опережает напряжение на 90° (рис. 12). В соответствии с первым законом Кирхгофа общий ток I, потребляемый такой цепью от источника питания, определяется геометрической суммой токов отдельных ветвей: $\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_K + \bar{I}_C$.

Геометрическое построение для определения величины и фазы общего тока представлено на рис. 12, где обозначено:

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

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

Под активной составляющей тока понимают составляющую тока, совпадающую по фазе с приложенным 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, но удобные для расчетов.

Из векторной диаграммы следует, что

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

Следовательно, величина общего тока

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

а угол сдвига фаз между общим током и приложенным напряжением

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

Данная векторная диаграмма построена в предположении, что емкостной ток I_C 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.

Коэффициентом мощности называют отношение активной мощности к полной мощности:

$$\cos\varphi = P/S.$$

Коэффициент мощности показывает, какая часть электрической энергии, вырабатываемой источником переменного тока (генератором, трансформатором и др.) необратимо преобразуется в другие виды энергии, в частности, используется на выполнение полезной работы. Очевидно, что чем выше cos φ, тем больше полезная работа (активная мощность P), совершаемая в электрической цепи при том же потребленном токе и напряжении. Высокий коэффициент мощности предприятий приводит к более полному использованию мощности электростанций и снижению потерь электроэнергии при передаче её потребителю. При низком коэффициенте мощности промышленное

оборудование оказывается загружено по току, но недоиспользовано по активной мощности. Следовательно, не полностью используются генератор. трансформатор, линия электропередачи и другое электротехническое оборудование, которое бесполезно загружается реактивным током. При этом увеличиваются и потери электрической энергии от всех токопроводящих частей.

Зависимость какого либо параметра электрической цепи от частоты протекаемого тока называют частотной характеристикой электрической цепи. Как известно от частоты протекаемого тока зависят реактивные сопротивления элементов электрической цепи. При этом реактивные индуктивные и емкостные сопротивления имеют разные знаки. Очевидно, что при изменении частоты изменяются реактивные сопротивления элементов цепи, и, следовательно, полное сопротивление такой цепи относительно входных выводов. При определенных условиях на определенной частоте реактивные сопротивления могут компенсировать друг друга. Тогда полное сопротивление цепи относительно каких либо двух выводов может оказаться чисто активным. В этом случае в цепи возникает явление резонанса. При резонансе токи в ветвях и напряжения на элементах могут резко отличаться от токов и напряжений при нерезонансном режиме. На этом основана работа электрических фильтров. Под электрическими фильтрами понимают четырехполюсники, составленные из катушек индуктивности и конденсаторов, включаемые между источником питания и нагрузкой, которые из всего спектра частот источника пропускают к приемнику беспрепятственно или пропускают с большим затуханием (задерживают) токи одного или нескольких заданных диапазонов частот. Электрические фильтры широко применяются в технике проводной связи, в радиотехнике, электронике. Впервые применил электрический фильтр для одновременного телеграфирования и телефонирования по одному проводу русский военный связист капитан Игнатьев Г. Г. в 1881г. Диапазон частот, пропускаемых фильтром без затухания, называют полосой прозрачности (пропускания). Диапазон частот, пропускаемых фильтром с затуханием, называют полосой затухания. Различные комбинации катушек индуктивности и конденсаторов позволяют получать фильтры, различные по своим свойствам. Различают низкочастотные, высокочастотные, полосовые, заграждающие фильтры.

Электрическая цепь при последовательном соединении элементов может иметь три режима:

1) реактивное сопротивление цепи имеет активно-индуктивный характер, при этом $X>0$, $X_L>X_C$;

2) реактивное сопротивление цепи имеет активно-емкостной характер, при этом $X<0$, $X_L<X_C$;

3) реактивное сопротивление цепи равно 0 и $X_L=X_C$. В цепи имеет место явления резонанса напряжений.

При этом $X=\omega_0 L - 1/\omega_0 C$; $\omega_0 L=1/\omega_0 C$; $\omega^2_0 LC=1$.

Резонанс можно достичь, изменяя параметры L, C или частоту источника питания ω. При резонансе параметры цепи связаны соотношениями:

$$L=1/\omega^2_0 C;\ C=1/\omega^2_0 L;\ \omega_0=1/\sqrt{LC}\,.$$

Частоту ω_0 называют резонансной частотой. При этой частоте ток имеет наибольшее значение $I=U/R$. Напряжение на активном сопротивлении равно напряжению на входе цепи, а напряжения на емкости U_C и индуктивности U_L равны по величине и противоположны по фазе.

Если выполняются соотношения $X_{L0} = X_C >> R$, то напряжения на емкости и индуктивности могут значительно превышать входное напряжение U. Поэтому данное явление получило название резонанса напряжений.

Превышение напряжения на реактивных элементах цепи над напряжением на входных зажимах цепи имеет место при условии

$$R << \omega_0 L = 1/\omega_0 C = \sqrt{L/C} = \rho.$$

Величину $\rho = \sqrt{L/C}$ называют волновым или характеристическим сопротивлением контура.

Отношение

$$U_{C0}/U = U_{L0}/U = \omega_0 L/R = 1/\omega_0 CR = L/R\sqrt{LC} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} = \rho/R = Q$$

определяет кратность превышения напряжения на зажимах индуктивности и емкостного сопротивления над входным напряжением и называется *добротностью контура.*

Величину, обратную добротности, называют затуханием контура

$$d = 1/Q.$$

Примерный вид частотных характеристик последовательной цепи показан на рис. 13.

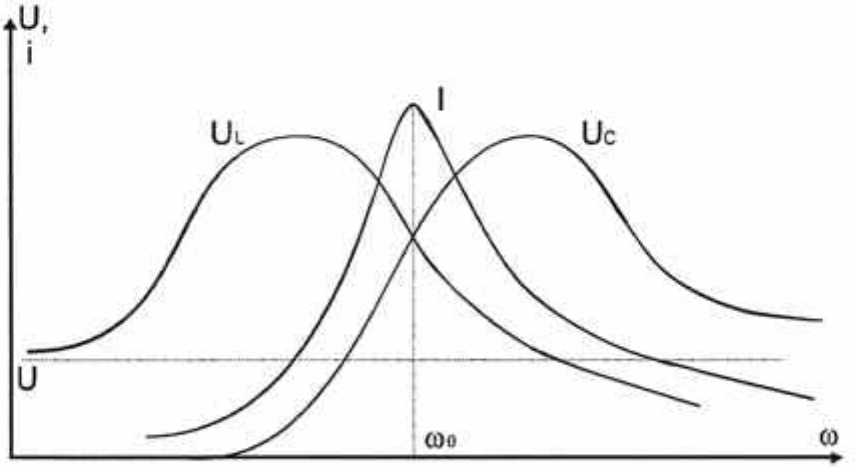


Рис. 13

В цепи, состоящей из параллельно соединенных индуктивностей и емкостей, возможен резонанс токов. В такой цепи справедливы соотношения (в стендном виде)

$$\dot{I} = \dot{U}\underline{Y}_1 = \dot{U}(g_1 - jb_1); \quad \dot{I}_2 = \dot{U}\underline{Y}_2 = \dot{U}(g_1 - jb_2); \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{U}(g_1 + g_2) - jU(b_1 + b_2);$$

При резонансе ток $\dot{I}$ совпадает по фазе с напряжением $\dot{U}$. Это возможно, если $b_1 + b_2 = 0$. При этом

$$b_1 = \frac{\omega L}{R_1^2 + \omega^2 L^2}; \quad b_2 = -\frac{\frac{1}{\omega C}}{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}; \quad \frac{\omega_0 L}{R_1^2 + \omega_0^2 L^2} = -\frac{\frac{1}{\omega_0 C}}{R_2^2 + \frac{1}{\omega_0^2 C^2}}.$$

Если сопротивления R_1 и R_2 малы, то соотношения упрощаются:

$$\omega^2 LC = 0; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

В идеальном случае, когда $R_1 = R_2 \quad = 0$, ток в неразветвленной части цепи равен нулю и входное сопротивление стремится к бесконечности. Частотные характеристики при резонансе токов имеют вид, показанный на рис. 14.

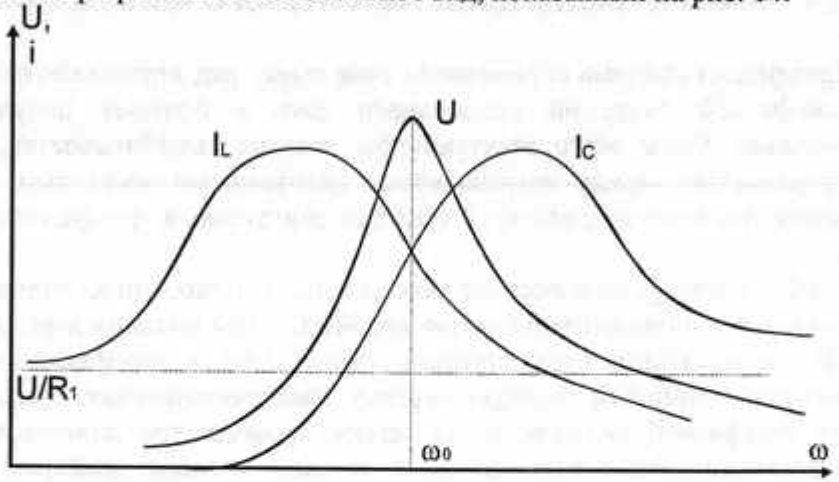


Рис. 14

Полосой пропускания называют диапазон частот $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$, в котором $I \geq \frac{I_0}{\sqrt{2}}$, где $I_0 = U/R$ – ток при резонансе. Чем больше добротность Q, тем уже полоса пропускания.

Добротность может быть вычислена по значениям по значениям граничных частот ω_1, ω_2 или f_1, f_2:

$$Q = \omega_0/(\omega_2 - \omega_1) = f_0/(f_2 - f_1).$$

На граничных частотах значение тока уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с током при резонансе I_0.

Благозвучность термина «добротность» объясняется тем, что величина Q определяет избирательные (селективные) и усилительные свойства контура. При существовании на входе контура большого числа сигналов различных частот высокая добротность позволяет выделить на реактивном элементе напряжение одной фиксированной частоты, существенно большее по амплитуду по сравнению с входным сигналом той же частоты.

Реальные реактивные элементы электрических цепей, исследуемые в лабораторной работе, отличаются от идеальных реактивных элементов в основном потерями энергии. Потери энергии в схеме замещения реактивного элемента учитываются резистором, соединенным последовательно или

параллельно с идеальным реактивным элементом. Для используемых в лабораторной работе реактивных элементов потери в индуктивной катушке существенно превышают потери в конденсаторах. Поэтому для относительно низких частот, включая резонансную частоту, потерями в конденсаторе можно пренебречь. Тогда в схемах замещения конденсатор можно представить емкостью С, а индуктивную катушку представить в виде последовательного соединения резистора R и индуктивности L. При этом напряжение на индуктивной катушке обозначается как U_K. Принятую схему замещения катушки необходимо учитывать в ходе эксперимента и при обработке результатов измерений.

2.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

Трехфазная система переменного тока имеет ряд преимуществ по сравнению с однофазной системой переменного тока и поэтому получила широкое применение. 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 уравнительный ток I_0, называемый нулевым или нейтральным током. Такая система соединения обмоток трехфазного генератора и приемников (потребителей) называется «звездой» и показана на рис. 15.

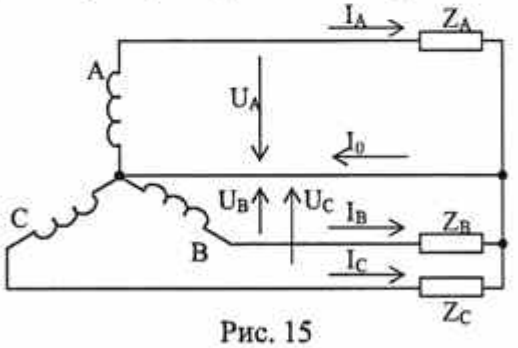


Рис. 15

При соединении в звезду фазный ток $I_Ф$ одновременно является и линейным током $I_Л$:

$$I_Ф = I_Л .$$

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

$$U_Л = \sqrt{3}\ U_Ф .$$

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°. Нетрудно сделать вывод, что 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. 16).

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

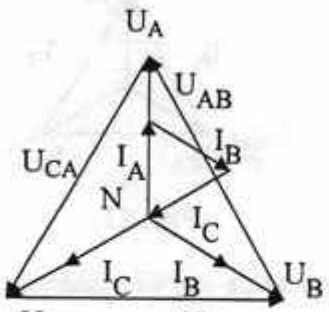


Рис. 16

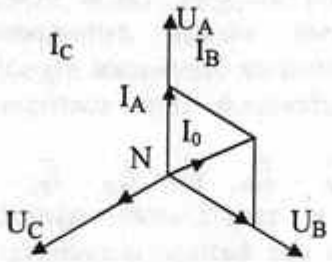


Рис. 17

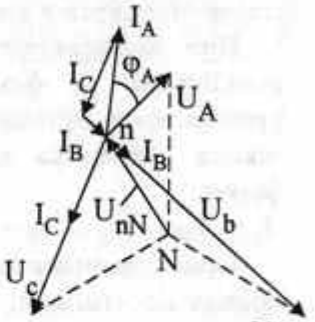


Рис. 18

первого закона Кирхгофа равен геометрической сумме векторов фазных токов (рис. 17)

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

Обрыв нейтрального провода (трехпроводная система) при несимметричной нагрузке приводит к изменению напряжений на всех фазах потребителей и появлению напряжения смещения нейтрали U_{Nn} (рис. 18). Положение точки «n» на векторной диаграмме при измеренных значениях напряжений на фазах потребителей $U_{AП}$, $U_{BП}$ и $U_{CП}$ может быть определено методом засечек (рис. 19) или рассчитано аналитически.

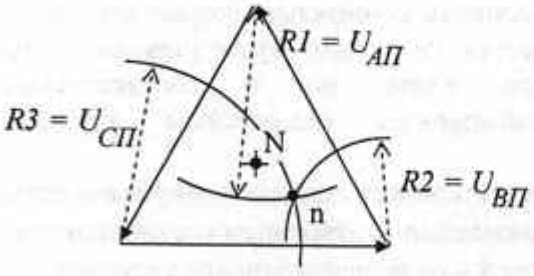


Рис. 19

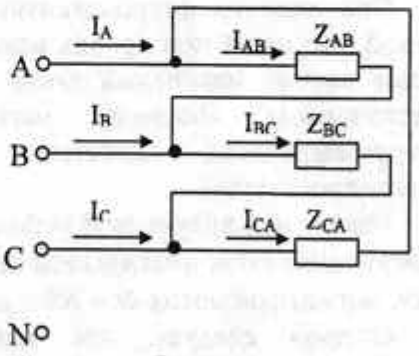


Рис. 20

Потребители электрической энергии при питании от трехфазного источника, как и источники электрической энергии, могут быть соединены в треугольник (рис. 20).

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 $U_Ф = U_Л$, а линейные токи в $\sqrt{3}$ раз больше, чем токи в фазах потребителя:

$$I_Л = \sqrt{3}\ I_Ф .$$

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. 21).

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

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

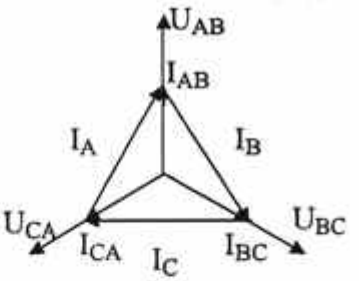


Рис. 21

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

2.5. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

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

При наличии ферромагнитного 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 $Ф = BS = \mu HS$, 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

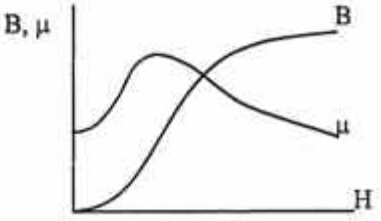


Рис. 20

(сердечником) из ферромагнитного материала, чаще всего из электротехнической стали.

Так как зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов $\mu(H)$ является нелинейной (рис. 20), 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. 21). Кривая, проходящая через начало координат, является основной кривой намагничивания. Она снимается при одностороннем намагничивании не намагниченного предварительно материала.

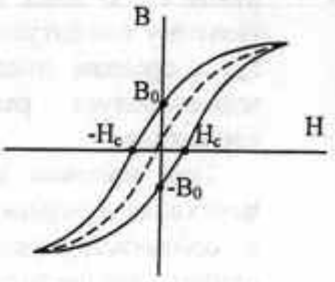


Рис. 21

При питании катушки переменным током ферромагнитный магнитопровод из-за переменного магнитного потока циклически, с частотой тока перемагничивается по кривой гистерезиса, обусловленной наличием остаточной магнитной индукции B_0 и коэрцитивной силы H_C (рис. 21). За несколько полупериодов переменного тока в процессе циклического перемагничивания 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 (потери мощности в стали) P_{CT} включают в себя потери на гистерезис $P_Г$ и потери от вихревых токов $P_{ВТ}$, наводимых переменным магнитным потоком в металле магнитопровода, : $P_{CT} = P_Г + P_{ВТ}$.

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. 22 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 $\varphi < 90°$. Наличие сдвига по фазе между напряжением

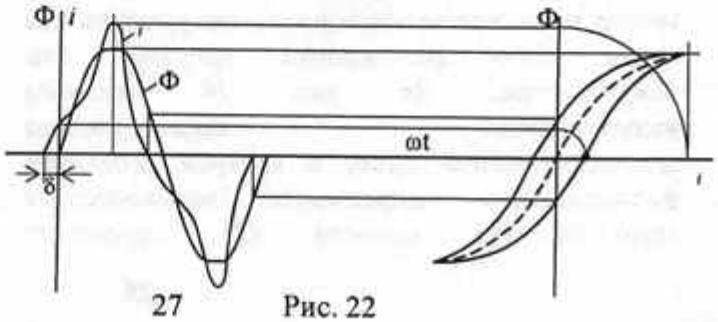


Рис. 22

и током меньшего, чем 90° указывает на то, что активная мощность в цепи не равна нулю даже если активное сопротивление обмотки катушки рано 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.

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

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

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

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

$$Z_{ЭК} = U/I.$$

Активное эквивалентное сопротивление катушки 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

$$R_{ЭК} = P/I^2 = P_{СТ}/I^2 + R.$$

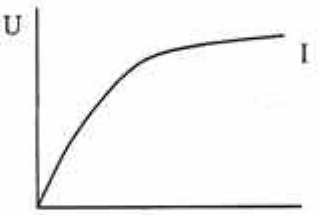


Рис. 23

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. 23). По форме она повторяет кривую намагничивания сердечника $B(H)$.

В цепях переменного тока, содержащих катушку с ферромагнитным сердечником и конденсатор, резонансные явления, связанные с нелинейным характером индуктивности, называются феррорезонансом. В отличии 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. 24 показана вольтамперная характеристика последовательной цепи, в которой возможен феррорезонанс напряжений. Вольтамперная характеристика емкости (2) пересекает

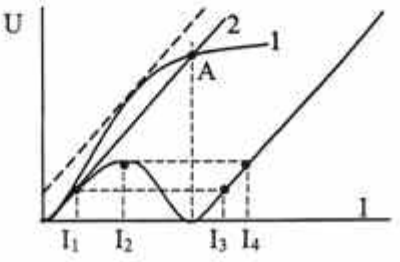


Рис. 24

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. Скачкообразное изменение тока сопровождается изменением на 180° фазы тока по отношению к напряжению (опрокидывание фазы).

Явление резкого изменения тока в цепи при незначительных изменениях напряжения на входе цепи иногда называют триггерным эффектом в последовательной феррорезонансной цепи. Он имеет место при малых значениях активного сопротивления 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.

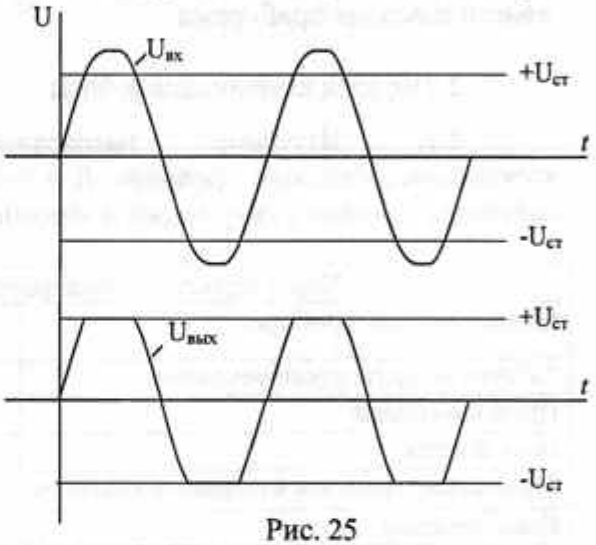


Рис. 25

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 входного и остается постоянным (рис. 25). В низкочастотных устройствах часто используют ограничители на стабилитронах (рис. 26). Вольтамперная характеристика двуханодного стабилитрона показана на рис. 27. С помощью этих устройств легко формировать трапецеидальное напряжение из синусоидального напряжения (рис. 25). Если амплитуда $U_{BX}>>U_{CT}$ можно получить напряжение, близкое по форме к прямоугольным импульсам.

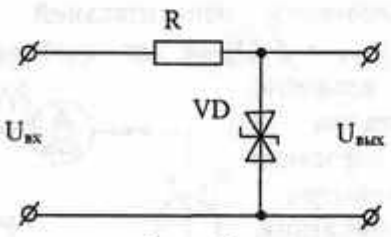


Рис. 26

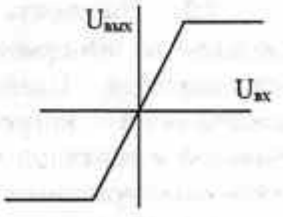


Рис. 27

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Работа № 1. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

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. Порядок выполнения работы

2.1. Изучение паспортных характеристик стрелочных электроизмерительных приборов. Для этого внимательно рассмотреть лицевые панели стрелочных амперметров и заполнить табл. 1.

Таблица 1

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

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

2.3. Измерить величину сопротивления, заданного преподавателем, методом амперметра и вольтметра. Для этого собрать электрическую цепь по рис. 1. Установить тумблер режима работы измерителя тока в позицию «=».

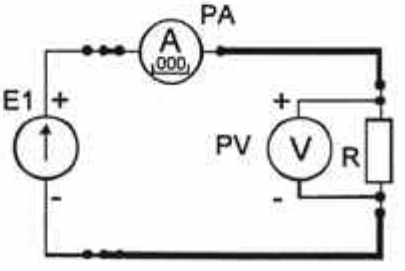


Рис. 1

После проверки схемы, включить электропитание и занести полученные данные в табл. 2. Выключить электропитание. Рассчитать, используя закон Ома, величину заданного сопротивления R. Результат занести в табл. 2.

Таблица 2

U, В	I, мА	R, Ом

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

а) наименование работы и цель работы;

б) технические данные измерительных приборов;

в) график зависимости относительной погрешности измерений $\gamma_{изм} = f(A_{изм})$;

г) результаты измерений;

д) выводы по работе.

4. 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?
8. Как можно измерить величину сопротивления резистора?

Работа № 2. ПРОСТЕЙШИЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ 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 постоянного тока. Исследовать особенности последовательного и параллельного соединения в электрических цепях постоянного тока.

2. Предварительное домашнее задание

2.1. Изучить тему «Линейные электрические цепи постоянного тока», содержание данной лабораторной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы к ней.

2.2. Начертить принципиальные схемы исследуемых цепей исследуемых цепей с включенными измерительными приборами.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

3.2. Собрать линейную электрическую цепь постоянного тока с последовательным соединением элементов (рис. 1), выбрав элементы цепи и величину напряжения питания в соответствии с заданным вариантом (табл. 1). Представить схему для проверки преподавателю.

Таблица 1

Вариант	1	2	3	4	5	6
E2, В	12	10	8	12	10	8
R1*	R5-1	R5-2	R5-3	R5-1	R5-2	R5-3
R2*	R3	R3	R3	R8	R8	R8

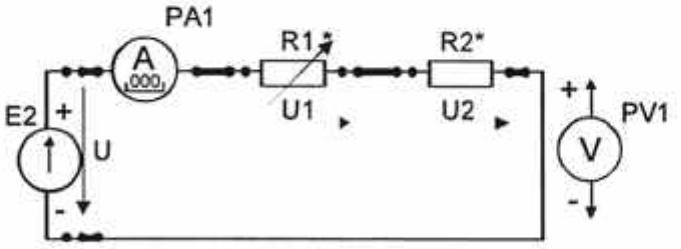


Рис. 1

3.3. Включить электропитание стенда и источник электропитания E2. Установить в соответствии с заданным вариантом значение напряжение источника E2, подключив к его выходным клеммам вольтметр. Подключая вольтметр PV1 к соответствующим гнездам, измерить величину напряжения на резисторах R1 и R3, а также ток I в цепи. Результаты измерений занести в табл.

2. Изменить по указанию преподавателя величину сопротивления R1 с помощью соответствующего тумблера (позиции 1, 2 или 3) и снова провести аналогичные измерения. Выключить источник E2. По результатам измерений вычислить величину сопротивления каждого потребителя (R1 и R2) и общее (эквивалентное) сопротивление $R_Э$ цепи. Результаты вычислений занести в табл. 2. Выключить источник электропитания.

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

Таблица 2

Измерено				Вычислено		
Напряжение на входе цепи U, В	Ток в цепи, I, А	Напряжение на потребителе, В		Сопротивление потребителя, Ом		Эквивалентное сопротивление цепи, $R_Э$, Ом
		U1	U2	R1	R2	

3.4. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением резисторов (рис. 2), выбрав элементы цепи и величину напряжения питания в соответствии с заданным вариантом (табл. 3). Представить схему для проверки преподавателю.

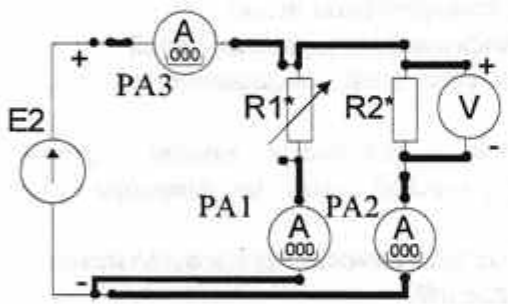


Рис. 2

3.5. Включить источник постоянного напряжения E2. Установить заданное значение напряжения питания. Измерить напряжения и токи на всех участках цепи. Результаты занести в табл. 4.

Таблица 3

Вариант	1	2	3	4	5	6
E2, В	12	10	8	12	10	8
R1*	R4-1	R4-1	R4-1	R4-2	R4-2	R4-3
R2*	R8	R8	R8	R9	R9	R9

3.6. Изменить по указанию преподавателя величину сопротивления R1 с помощью соответствующего тумблера и снова провести аналогичные измерения. Выключить электропитание. По результатам измерений рассчитать сопротивления резисторов R1, R2 и сопротивление всей цепи $R_Э$, проводимости отдельных ветвей g1 и g2 и всей цепи $g_Э$. Результаты вычислений занести в табл. 4. Убедиться в соблюдении первого закона Кирхгофа.

3.7. Проанализировать влияние изменения величины сопротивления резистора R1 на режим работы цепи и отдельных потребителей. Объяснить, почему это имеет место.

Таблица 4

Измерено				Вычислено					
U, В	I1, А	I2, А	I3, А	R1, Ом	R2, Ом	g1. См	g2, См	gэ, См	Rэ. Ом
		—	—						
			—						

3.8. Сделать выводы о выполнении законов Кирхгофа и о применении закона Ома в линейной электрической цепи постоянного тока.

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

а) наименование работы и цель работы;

б) схемы экспериментов и таблицы полученных экспериментальных данных;

в) результаты расчетов;

г) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое «линейный элемент» в электрической цепи?

2. Привести примеры линейных элементов электрических цепей.

3. В каких единицах измеряются сила тока, напряжение, мощность и сопротивление?

4. Как по показаниям амперметра и вольтметра можно определить величину сопротивления участка электрической цепи постоянного тока и потребляемую им мощность?

5. Нарисуйте схемы для измерения методом амперметра и вольтметра больших и малых электрических сопротивлений.

6. Как определить величину эквивалентного сопротивления при последовательном соединении резисторов?

7. Как определить величину эквивалентного сопротивления при параллельном соединении резисторов?

8. Для исследуемых электрических цепей запишите уравнения по законам Кирхгофа.

9. В чем заключается баланс мощностей в цепи постоянного тока?

Работа № 3. СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы

Получение навыков сборки электрических цепей, измерений токов и напряжений на отдельных участках электрической цепи; убедиться в соблюдении законов Кирхгофа в разветвленной линейной электрической цепи; научиться применять законы Кирхгофа в графическом виде. Исследовать особенности смешанного соединения элементов в электрических цепях постоянного тока.

2. Предварительное домашнее задание

2.1. Изучить тему «Линейные электрические цепи постоянного тока», содержание данной лабораторной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы к ней.

2.2. Начертить принципиальные схемы исследуемых цепей исследуемых цепей с включенными измерительными приборами.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

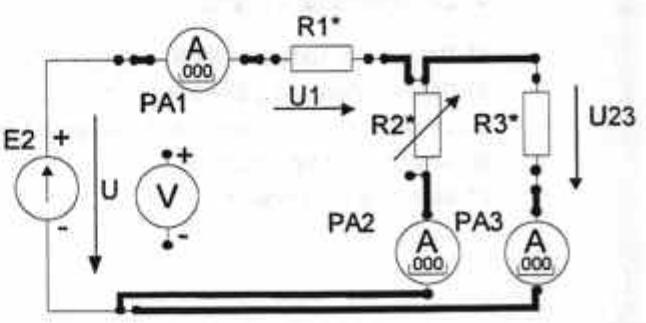
3.2. Собрать цепь со смешанным соединением резисторов (рис. 1). Собрать цепь со смешанным соединением резисторов, выбрав элементы цепи и величину напряжения питания в соответствии с заданным вариантом (табл. 1). Представить схему для проверки преподавателю (рис. 1).

Таблица 1

Вариант	1	2	3	4	5	6
E2, В	12	10	8	12	10	8
R1*	R3	R3	R3	R3	R3	R3
R2*	R5-1	R5-1	R5-1	R5-2	R5-2	R5-3
R3*	R8	R8	R8	R8	R8	R8

3.3. После проверки схемы преподавателем включить источник питания E2, установить заданное значение величины напряжения питания и измерить напряжения на входе цепи U и на всех участках цепи (U1 и U2), а также все токи (I1,I2 и I3). Результаты занести в табл. 2.

3.4. С помощью соответствующего тумблера установить новое значение резистора R2 и снова измерить напряжения и токи в цепи. Выключить источник питания E2. По результатам измерений вычислить мощность каждого участка цепи P1, P2, P3 и всей цепи P, определить эквивалентное сопротивление цепи



$R_Э$. Результаты вычислений занести в табл. 2. Выключить электропитание. Рис. 1

3.5. Проанализировать влияние изменения величины сопротивления резистора R2 на режим работы всей цепи и отдельных потребителей. Объяснить, почему это имеет место.

Таблица 2

Измерено						Вычислено				
U, В	U1, В	U2, В	I1, А	I2, А	I3, А	P1, Вт	P2, Вт	P3, Вт	P, Вт	$R_Э$, Ом

3.6. Проверить выполнение баланса мощностей.

3.7. Сделать выводы о выполнении законов Кирхгофа.

3.8. Включить электропитание. Плавно изменяя величину входного напряжения с помощью потенциометра RP1, измерить значения напряжения и токов на всех участках цепи при трех различных значениях входного напряжения. Результаты измерений занести в табл. 3. Выключить электропитание.

Таблица 3

№ опыта	U, В	U1, В	U2, В	I1, мА	I2, мА	I3, мА
1						
2						
3						

3.9. По результатам измерений построить в одной координатной системе вольтамперные характеристики резисторов R1, R2, R3. Пользуясь ими, построить вольтамперную характеристику всей цепи $Uвх = f(I1)$ и по ней определить эквивалентное сопротивление цепи $Rэкв$. Здесь же построить экспериментальную вольтамперную характеристику цепи $Uвх = f(I1)$, сравнить её с расчетной вольтамперной характеристикой всей цепи и сделать вывод о возможности графического применения законов Кирхгофа.

3.10. Сделать вывод о возможности применения законов Кирхгофа в графическом виде в электрической цепи постоянного тока.

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

а) наименование работы и цель работы;

б) схемы экспериментов и таблицы полученных экспериментальных данных;

в) результаты расчетов;

г) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Как по показаниям амперметра и вольтметра можно определить величину сопротивления участка электрической цепи постоянного тока и потребляемую им мощность?

2. Нарисуйте схемы для измерения методом амперметра и вольтметра больших и малых электрических сопротивлений.

3. Как определить величину эквивалентного сопротивления для исследуемой цепи?

4. Для исследуемых электрических цепей запишите уравнения по законам Кирхгофа.

5. Как по вольтамперной характеристике определить величину сопротивления цепи?

6. Как применить закон Кирхгофа в графическом виде для последовательной и параллельной цепи?

Работа № 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

1. Цель работы

Экспериментальная проверка результатов аналитического расчета линейной электрической цепи с двумя источниками электропитания.

2. Предварительное домашнее задание

2.1. Изучить тему «Линейные электрические цепи постоянного тока с несколькими источниками электропитания», содержание данной лабораторной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы к ней.

2.2. Начертить принципиальную схему исследуемой цепи с включенными измерительными приборами.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

3.2. Включить электропитание стенда и источники E1 и E2. Измерить значения эдс источника E1 и установить заданное значение эдс источника E2 (табл. 1). Результаты измерений занести в табл. 4. Выключить электропитание.

3.2. Собрать цепь с двумя источниками электропитания (рис. 1), выбрав элементы цепи в соответствии с заданным вариантом (табл. 1). Представить схему для проверки преподавателю.

Таблица 1

Вариант	1	2	3	4	5	6
E2, В	12	10	12	10	12	10
R1*	R1-2	R1-1	R1-3	R1-1	R1-2	R1-3
R2*	R3	R3	R3	R3	R3	R3
R3*	R9	R8	R9	R9	R8	R8

3.3. Включить электропитание стенда и источник электропитания E2.

3.3. Включить источник питания E1 и измерить напряжения U1, U2 на источниках E1, E2, напряжения на резисторах R1*, R2* и R3*, и токи I1, I2 и I3 в ветвях. Результаты измерений занести в табл. 2.

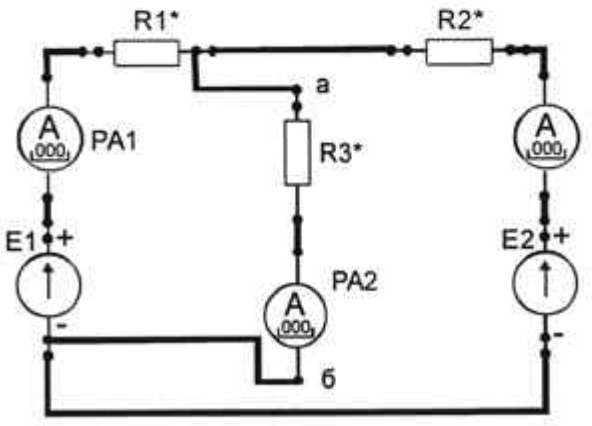


Рис. 1

Таблица 2

E1, В	E2, В	U1, В	U2, В	U_{R1}, В	U_{R2}, В	U_{R3}, В	I1, мА	I2, мА	I3, мА

3.4. По результатам измерений вычислить значения сопротивлений R1*, R2* и R3*. Результаты вычислений занести в табл. 3.

Таблица 3

R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	Uаб, В	I1, мА	I2, мА	I3, мА	U_{R1}, В	U_{R2}, В	U_{R3}, В

3.5. Используя полученные результаты измерений эдс источников питания и расчета сопротивлений R1*, R2* и R3* ветвей, рассчитать, используя метод узлового напряжения, величину узлового напряжения Uаб, токи I1, I2, I3 и напряжения на резисторах U_{R1}, U_{R2}, U_{R3}. Результаты вычислений занести в табл. 3. Сравнить расчетные значения токов и напряжений с их экспериментальными значениями.

3.6. Подготовить неразветвленную электрическую цепь с двумя источниками по рис. 2 (исключить ветвь с резистором R3). После проверки схемы преподавателем разомкнуть цепь (изъять один из соединительных проводников), включить источник E2 и установить значение эдс 12 В и измерить эдс источника E1. Выключить электропитание и вернуть проводник на место. Включить электропитание стенда и источник E2. После этого включить другой источник питания (E1).

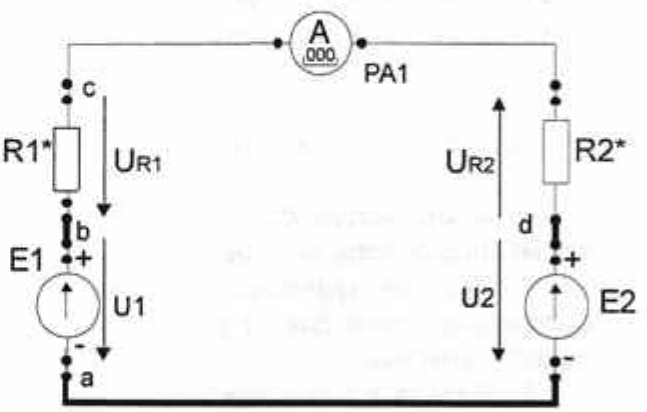


Рис. 2

3.7. Полагая потенциал точки «а» равным нулю, измерить потенциалы точек «б», «с», «d» и «е». а также ток в цепи. Результаты занести в табл. 4.

3.8. По результатам измерений вычислить (табл. 4):

а) напряжения U1 и U2 на зажимах источников электропитания E1 и E2;

б) внутренние сопротивления источников питания R_{01}, R_{02};

б) сопротивления R1*, R2* и R3*;

в) определить, в каком режиме (источника или потребителя) работают источники питания E1 и E2.

3.9. Изменить по указанию преподавателя величину резистора R1* соответствующим тумблером и снова измерить те же величины. Обратить при

этом внимание, изменилось ли при этом направление тока в цепи. Определить, в каком режиме (источника или потребителя) работают теперь источники питания E1 и E2. Результаты занести в табл. 4. Выключить электропитание.

Таблица 4

Измерено							Вычислено							
E1, В	E2, В	I, мА	φa, В	φb, В	φc, В	φd, В	U1, В	U2, В	U_{R1} В	U_{R2} В	R1, Ом	R2, Ом	R_{01}, Ом	R_{02}, Ом
			0											

3.9. Для контура построить потенциальную диаграмму.

3.10. Построить внешние характеристики источников питания *U1=f(I1)* и *U2=f(I2)*. Указать на них рабочие точки, соответствующим режимам работы источников E1 и E2 в данной цепи.

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

а) наименование и цель работы;

б) схемы эксперимента и таблицы с результатами измерений и вычислений;

в) расчетные соотношения и экспериментальные характеристики;

г) сравнение результатов расчета с экспериментальными данными;

д) выводы

5. Контрольные вопросы

1. Какие метода анализа цепей постоянного тока могут быть использованы для анализа исследуемой цепи?

2. Сколько уравнений по законам Кирхгофа необходимо записать для исследуемой цепи для её расчета? Сколько из них надо записать по второму закону Кирхгофа?

3. Запишите для исследуемой цепи необходимые для анализа исследуемой цепи уравнения по законам Кирхгофа.

4. В каких случаях целесообразно применять метод узлового напряжения?

5. В чем состоит основное достоинство метода узлового напряжения?

6. Запишите соотношение для определения величины узлового напряжения в исследуемой цепи.

7. Как в исследуемой цепи при использовании метода узлового напряжения определить токи в ветвях? Запишите эти соотношения.

8. Что такое «внешняя характеристика» источника питания? Запишите уравнение внешней характеристики.

9. Что такое «потенциальная диаграмма»?

Работа № 5. НЕЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Цель работы

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

2. Предварительное домашнее задание

2.1. Изучить тему «Расчет простейших нелинейных электрических цепей постоянного тока», содержание данной лабораторной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы к ней.

2.2. Начертить принципиальную схему исследуемой цепи с включенными измерительными приборами.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

3.2. Собрать трехфазную электрическую цепь (рис. 1), выбрав элементы цепи в соответствии с заданием. Представить схему для проверки преподавателю.

Собрать электрическую цепь для снятия вольтамперных характеристик элементов цепи (рис. 1) и предъявить её для проверки преподавателю. В качестве регулируемого источника постоянного напряжения использовать источник E2, выходное напряжение которого регулируется потенциометром RP1.

Предъявить схему для проверки преподавателю.

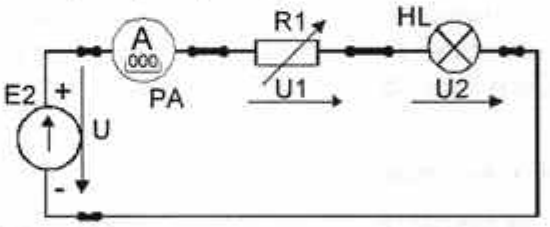


Рис. 1

3.3. Снять вольтамперные характеристики лампы накаливания *HL*, резистора R1 и всей цепи. Для этого установить выходное напряжение источника питания E2 равное нулю (ручку потенциометра RP1 в крайнее левое положение). Включить стенд и источник E2. Увеличивая плавно выходное напряжение потенциометра RP1 провести необходимые измерения при изменении тока от 0 до 80…100 мА. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить источник питания. В одной координатной системе построить вольтамперные характеристики цепи, лампы накаливания *HL* и резистора R1.

Таблица 1

I, A	0									
U, B	0									
$U_л$, B	0									
U_R, B	0									

3.4. Записать уравнение второго закона Кирхгофа для исследуемой цепи. Используя экспериментальные вольтамперные характеристики резистора и лампы накаливания, построить в той же системе координат расчетную вольтамперную характеристику всей цепи $U_{расч}=f(I)$ и сравнить её с полученной экспериментально вольтамперной характеристикой цепи $U_{эксп}=f(I)$.

3.5. Для указанного преподавателем значения входного напряжения выполнить графический расчет тока и напряжений на отдельных участках цепи по рис. 1. Результаты расчета занести в табл. 2.

Таблица 2

	U, В	U_{HL}, В	U_R, В	I, А
Расчет				
Эксперимент				

3.6. Для проверки расчета нелинейной цепи включить источник и установить заданное (расчетное) значение входного напряжения U. Измерить ток I и напряжения U_R и U_{HL} на отдельных участках цепи. Результаты занести в табл. 2.

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

3.8. По указанию преподавателя рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления лампы накаливания.

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) сравнение результатов расчета с экспериментальными данными;

д) выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое «нелинейный элемент» в электрической цепи?

2. Привести примеры нелинейных элементов электрических цепей и их вольтамперных характеристик.

3. Почему для нелинейной цепи удобен графический способ анализа?

4. Справедливы ли для нелинейных цепей законы Кирхгофа?

5. Как построить вольтамперную характеристику последовательного соединения нелинейных элементов?

6. Как построить вольтамперную характеристику параллельного соединения нелинейных элементов?

7. Как определяется статическое сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для разных точек вольтамперной характеристики нелинейного элемента?

8. Как определяется динамическое сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для разных точек вольтамперной характеристики нелинейного элемента?

Работа № 6. РАЗВЕТВЛЕННАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы

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

2. Предварительное домашнее задание

2.1. Изучить тему «Графический расчет разветвленных нелинейных электрических цепей постоянного тока», содержание данной лабораторной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы к ней.

2.2. Начертить принципиальную схему исследуемой цепи с включенными измерительными приборами.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

3.2. Собрать электрическую цепь для снятия вольтамперной характеристики нелинейного элемента (рис. 1) и предъявить её для проверки преподавателю. В качестве регулируемого источника постоянного напряжения использовать источник E2, выходное напряжение которого регулируется потенциометром RP1. В качестве нелинейного элемента R1* использовать нелинейный резистор R6. ***Обратить внимание на полярность напряжения на нелинейном элементе R6.***

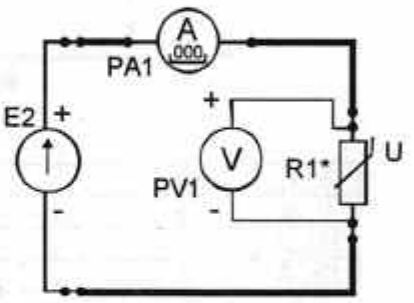


Рис. 1

Предъявить схему для проверки преподавателю.

3.3. Снять вольтамперную характеристику нелинейного элемента. Для этого установить ручку потенциометра RP1 в крайнее левое положение. Включить источник постоянного напряжения E2. Увеличивая плавно выходное напряжение потенциометра RP1 провести необходимые измерения при изменении тока от 0 до 60…80 мА. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить электропитание стенда. Построить вольтамперную характеристику нелинейного элемента.

Таблица 1

U, В	0									
I, А	0									

3.4. Снять вольтамперные характеристики лампы накаливания и резистора. Для этого собрать цепь с последовательным соединением лампы накаливания HL и линейного резистора R1* (рис. 2). В качестве исследуемого резистора R1* использовать резистор ***R5?***. Предъявить схему для проверки преподавателю.

Установить ручку потенциометра RP1 в крайнее левое положение. Включить модуль питания (выключатель QF1) и источник постоянного напряжения. Увеличивая плавно выходное напряжение потенциометра RP1 измерять напряжения на входе цепи U, на лампе накаливания $U_Л$ и на резисторе U_R, а также ток I. Результаты измерений занести в табл. 2. Выключить электропитание стенда. Построить вольтамперные характеристики цепи, лампы накаливания HL и резистора R1.

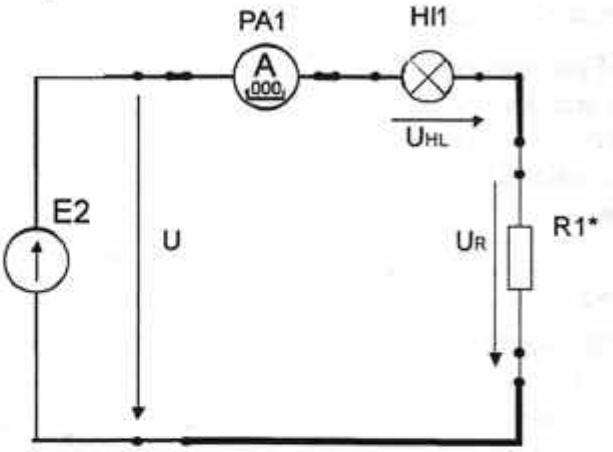


Рис. 2

Таблица 2

I, A	0									
U, B	0									
$U_Л$, B	0									
U_R, B	0									

3.5. Снять вольтамперную характеристику цепи со смешанным соединением элементов. Для этого собрать электрическую цепь по рис. 3 и предъявить её для проверки преподавателю. В качестве сопротивления R2* схемы использовать резистор **R3** стенда.

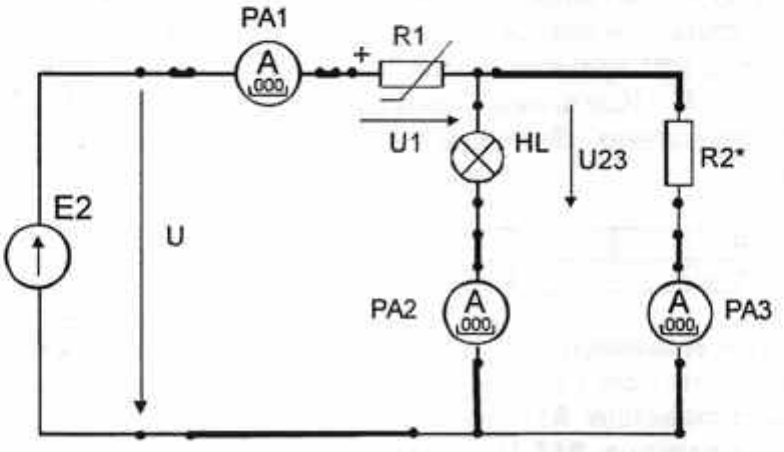


Рис. 3

3.6. Включить электропитание стенда и снять вольтамперную характеристику всей цепи $U_{эксп}=f(I)$. Установить ручку потенциометра RP1 в крайнее левое положение. Включить модуль питания (выключатель QF1) и источник постоянного напряжения. Увеличивая плавно выходное напряжение потенциометра RP1 измерять напряжения на входе цепи U и ток I_1, потребляемый от источника питания. Результаты измерений занести в табл. 3. Выключить электропитание стенда.

Таблица 3

U, B	0									
I , A	0									

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

3.8. 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.4.

Таблица 4

	U, B	U_1, B	U_{23}, B	I_1, A	I_2, A	I_3, A
Расчет						
Эксперимент						

3.9. Для проверки расчета нелинейной цепи включить электропитание и установить заданное значение входного напряжения U. Измерить токи I_1. I_2 и I_3, а также напряжения U_1 и U_{23} на отдельных участках цепи. Результаты занести в табл. 4.

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

3.11. По указанию преподавателя рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления нелинейного элемента.

3. 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.

4. 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 № 7. 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. Предварительное домашнее задание

2.1. Изучить тему «Простейшие электрические цепи переменного тока», содержание данной лабораторной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы к ней.

2.2. Начертить принципиальные схемы исследуемых цепей исследуемых цепей с включенными измерительными приборами.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

3.2. Экспериментальное определение величины сопротивления резистора.

Собрать схему по рис. 1. В качестве резистора R* использовать перестраиваемый резистор R11 или R10 (табл. 1). В соответствии с заданным вариантом установить соответствующий тумблер в заданную позицию (1, 2 или 3). Представить схему для проверки преподавателю.

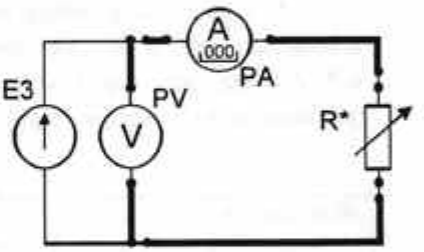


Рис. 1

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6
U, В	5	7	6	5	7	6
R*	R10-1	R10-2	R10-3	R11-1	R11-2	R11-3

Включить электропитание стенда и источник питания Е3, установить заданное значение напряжения источника питания и измерить величину напряжения и тока в цепи. Результаты занести в табл. 4.

3.3. Для определения величины емкости конденсатора собрать схему по рис. 2. В качестве исследуемого конденсатора С* использовать перестраиваемый конденсатор С1 в соответствующей позиции переключателя (например, запись С1-2 означает, что переключатель батареи конденсаторов С1 должен быть в позиции «2»). После проверки схемы преподавателем включить электропитание стенда и источник питания Е3, установить у измерителя мощности режим измерения частоты f. В соответствии с заданием (табл. 2) установить заданные значения величины напряжения питания и его частоты. Частоту устанавливать с

точностью ±(5…10) Гц. Измерить величину тока, напряжения и частоты в цепи. Результаты занести в табл. 4.

Таблица 2

№ варианта	1	2	3	4	5	6
U, В	5	5	5	7	7	7
C*	C1-1	C1-2	C1-3	C1-4	C1-5	C1-3
f, Гц	300±10	250±10	200±10	160±10	130±10	100±10

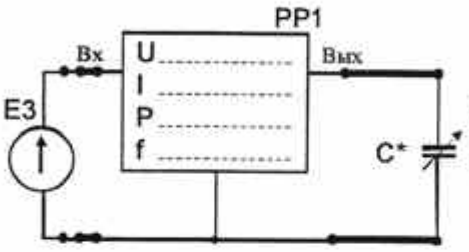


Рис. 2

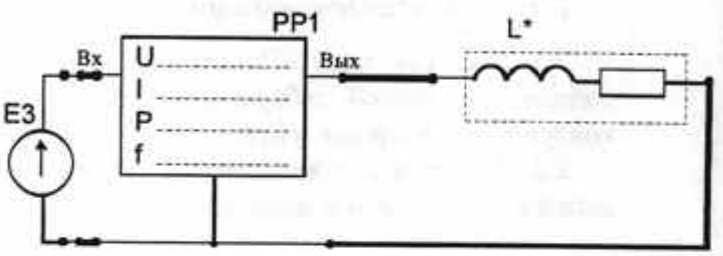


Рис. 3

3.4. Для определения параметров реальной катушки индуктивности собрать схему по рис. 3. В качестве исследуемой катушки L* использовать катушки L1, L2 стенда или их последовательное соединение (L1+ L2) в соответствии с заданным вариантом (табл. 3).

Таблица 3

№ варианта	1	2	3	4	5	6
L*	L1	L1	L2	L2	L1+L2	L1+L2
f, Гц	200	300	250	350	200	300

3.5. После проверки схемы преподавателем включить электропитание стенда и источник питания E3, установить значения величину напряжения питания 7 В и заданное значение частоты *f*. Частоту устанавливать с точностью ±(5…10) Гц. Измерить величину тока и активной мощности в цепи. Результаты занести в табл. 4.

3.6. Определить величину активного сопротивления катушки методом амперметра и вольтметра. Для этого подключить её к источнику постоянного напряжения E2 (рис. 4). Установить у цифрового амперметра режим измерения постоянного тока.

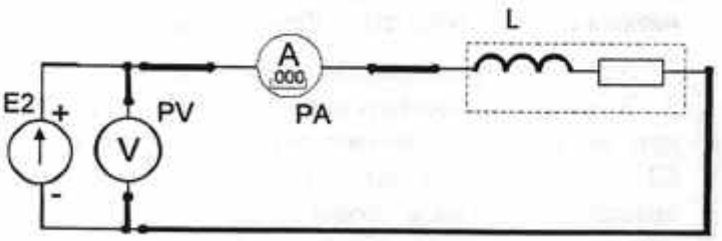


Рис. 4

После проверки схемы преподавателем включить источник питания Е2, установить у него выходное напряжение 10 В и измерить величину постоянного тока в цепи. Результат занести в табл. 4. Выключить электропитание.

Таблица 4

Включено	Измерено				Вычислено			
	U, В	I, мА	f, Гц	P, Вт	Z, Ом	R, Ом	L, мГн	C, мкФ
R*			-------	-------			--------	--------
C*				--------		--------	--------	
L*								--------
L*			-------	-------	-------		-------	-------

3.7. По результатам измерений рассчитать полное сопротивление Z каждого элемента, активное сопротивление R, величину индуктивности L и емкости C и построить векторные диаграммы.

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 № 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Цель работы

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

2. Предварительное домашнее задание

2.1. Изучить тему «Последовательное соединение элементов в цепи переменного тока», содержание данной лабораторной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы к ней.

2.2. Начертить принципиальные схемы исследуемых цепей исследуемых цепей с включенными измерительными приборами.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

3.2. Собрать электрическую цепь с последовательным соединением резистора R* и конденсатора C* (рис. 1), используя элементы цепи в соответствии с заданным вариантом (табл. 1). В качестве резистора R* использовать перестраиваемый резистор R10 в соответствующей позиции переключателя (табл. 1). У цифровых амперметров установить режим измерения переменного тока. Предъявить схему для проверки преподавателю.

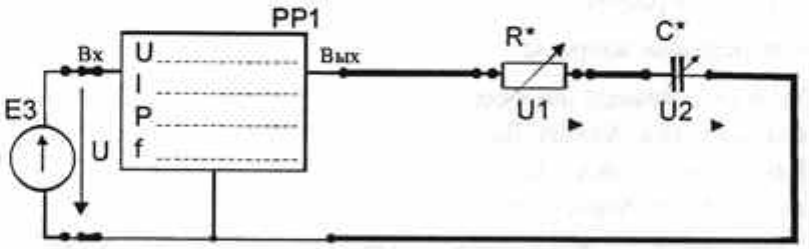


Рис. 1

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6
R*	R10-1	R10-2	R10-3	R10-1	R10-2	R10-3
C*	C2-5	C2-5	C2-5	C2-4	C2-4	C2-4

3.3. Включить питание стенда, источник переменного напряжения E3. Установить на выходе источника питания E3 напряжение 7 В с частотой 400±10 Гц. Провести измерения указанных в табл. 2 величин. Результаты измерений занести в табл. 2. Выключить источник электропитания E3.

Таблица 2

Схема	U, В	I, мА	U_R, В	U_K, В	U_C, В	P, Вт
RC				----------		
Z_KC			----------			

3.4. Собрать электрическую цепь с последовательным соединением реальной катушки индуктивности L* конденсатора C* (рис. 2), используя элементы цепи в соответствии с заданным вариантом (табл. 3). Предъявить схему для проверки преподавателю.

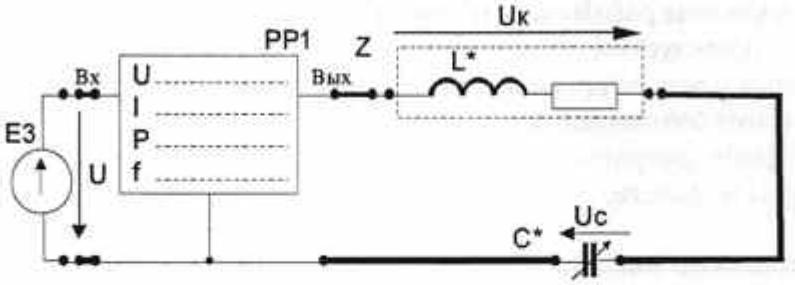


Рис. 2

Таблица 3

№ варианта	1	2	3	4	5	6
L*	L1	L1	L1	L2	L2	L2
C*	C2-1	C2-2	C2-3	C2-3	C2-4	C2-2

3.5. Включить электропитание, установить на выходе источника питания E3 напряжение 7 В с частотой ≈ 400±10 Гц. Провести измерения указанных в таблице величин для цепи с последовательным соединением реальной катушки индуктивности L и конденсатора C. Результаты измерений занести в табл. 2. Выключить электропитание.

3.6. Для исследованных цепей по результатам измерений рассчитать:

– полную мощность цепи S,

– реактивную мощность цепи Q,

– коэффициент мощности цепи $\cos\varphi$ и угол сдвига фаз φ между напряжением на входе цепи и током,

– коэффициент мощности катушки $\cos\varphi_K$ и угол сдвига фаз φ_K между напряжением на катушке и током,

– полные, активные и реактивные сопротивления всей цепи и отдельных участков (Z_K, R_K, X_K, X_C, $Z_Э$, $R_Э$, $X_Э$,).

Результаты занести в табл. 4.

Таблица 4

S=UI, ВА	$Q=\sqrt{S^2-P^2}$, ВАр	$\cos\varphi_K$	φ_K, град	$\cos\varphi$	φ, град	Z_K, Ом	R_K, Ом	X_K, Ом	X_C, Ом	$Z_Э$, Ом	$R_Э$, Ом	$X_Э$, Ом

3.7. По результатам измерений для исследованных цепей построить в масштабе векторные диаграммы, треугольники сопротивлений и мощностей, сделать вывод о характере каждой исследованной цепи.

3.8. 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?

9. В каком случае исследуемая цепь, содержащая катушку индуктивности и конденсатор, будет носить активно-индуктивный характер и в каком случае – активно-емкостной характер?

Работа № 9. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ. ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

1. Цель работы

Ознакомиться с особенностями режимов работы цепи переменного тока с параллельным соединения элементов, повышением коэффициента мощности, применением 1-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока.

2. Предварительное домашнее задание

2.1. Изучить тему «Параллельное соединение элементов в цепи переменного тока», содержание данной лабораторной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы к ней.

2.2. Начертить принципиальные схемы исследуемых цепей исследуемых цепей с включенными измерительными приборами.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

3.2. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением резистора R и конденсатора C (рис. 1). В качестве резистора R* использовать переключаемый резистор R10 в соответствующей варианту позиции переключателя (табл. 1). Установить в соответствии с заданным вариантом переключатель батареи конденсаторов C* в соответствующую позицию (табл. 1). Схему предъявить для проверки преподавателю.

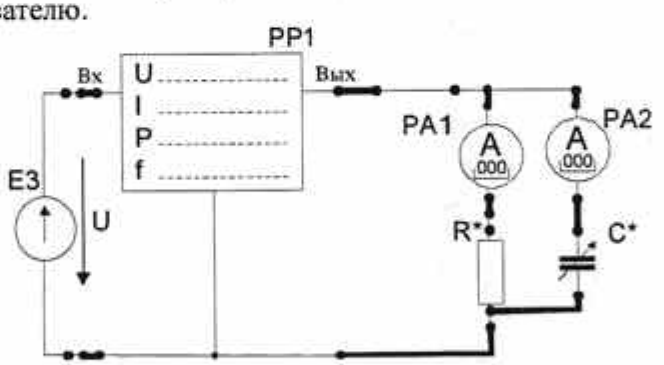


Рис. 1.

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6
R*	R10-1	R10-2	R10-3	R10-1	R10-2	R10-3
C*	C2-5	C2-5	C2-5	C2-4	C2-4	C2-3

3.3. Включить электропитание стенда и источник переменного напряжения E3. Установить напряжение источника E3 7 В с частотой 300±10 Гц.

Измерить напряжение на входе цепи, токи в ветвях, ток, потребляемый от источника питания, активную мощность P, потребляемую цепью и угол сдвига фаз φ между напряжением и током, потребляемым цепью. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

	Измерено							Вычислено	
Включены ветви	U, В	I, мА	f, Гц	P, Вт	I_R, мА	I_C, мА	I_L, мА	φ, град	cos φ
R,C							------		
Z_K					------	------			
Z_K, C1					------				
Z_K, C2					------				
Z_K, C3					------				

3.4. Исследовать влияние емкости C, включенной параллельно индуктивному потребителю, на коэффициент мощности цепи cos φ и величину тока I, потребляемого от источника питания. Для этого сначала собрать цепь по рис. 2, используя в качестве индуктивного потребителя соответствующую реальную катушку индуктивности L* (табл. 3). Представить схему для проверки преподавателю.

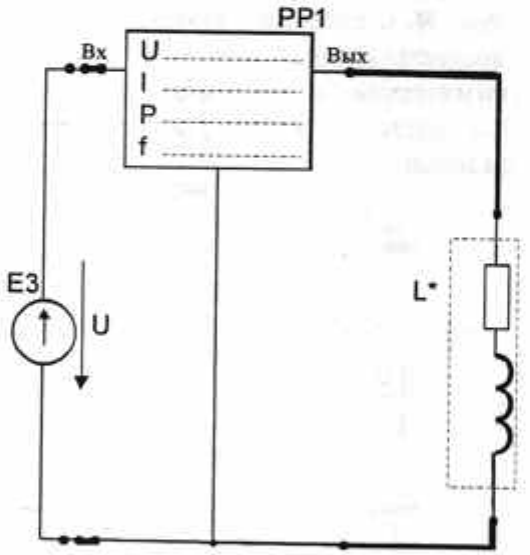


Рис. 2

3.5. Включить электропитание стенда и источник питания E3. Установить напряжение 7 В с частотой, указанной в таблице вариантов (табл. 3). Измерить напряжение, ток, активную мощность и угол сдвига фаз φ между напряжением и током на входе цепи. Результаты занести в табл. 2. Выключить источник питания E3.

3.6. Подключить параллельно катушке индуктивности батарею конденсаторов C* (рис. 3). Переключатель батареи конденсаторов установить в первую заданную позицию (табл. 3).

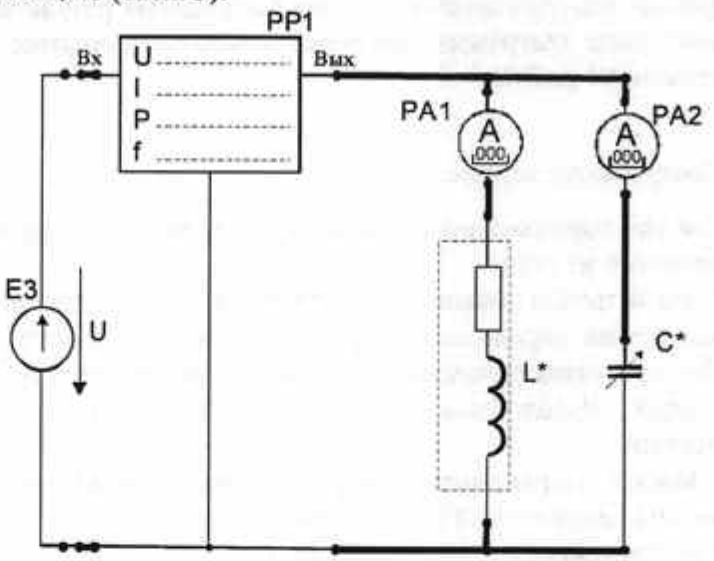


Рис. 3

Таблица 3

№ варианта	1	2	3	4	5	6
f, Гц	150±10	180±10	200±10	150±10	180±10	200±10
L*	L1	L1	L1	L2	L2	L2
C*	C1-1, 2, 4	C1-1, 2, 4	C1-1 ,2, 4	C1-1, 4, 5	C1-1, 4, 5	C1-1, 4, 5

3.7. После проверки схемы преподавателем включить источник питания E3. Установить напряжение источника 7 В с частотой, указанной в таблице вариантов (табл. 3) и измерить величины, указанные в табл. 2. Последовательно устанавливая переключатель батареи конденсаторов в следующие заданные позиции, измерить величины, указанные в табл. 2. Выключить электропитание.

3.8. По опытным данным построить в масштабе векторные диаграммы для каждого опыта, определив для каждого случая по векторной диаграмме характер электрической цепи и коэффициент мощности цепи cos φ.

3.9. Сделать выводы

– о влиянии параллельно включенных потребителей друг на друга;

– о влиянии конденсатора, подключенного параллельно индуктивному потребителю, на величину тока, потребляемого из сети и коэффициент мощности цепи;

– о применении 1-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока;

4. Содержание отчета

а) наименование работы и цель работы;
б) схемы экспериментов и таблица полученных результатов;
в) векторные диаграммы для всех проведенных опытов;
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 цепи, которая содержит параллельно включенные индуктивную катушку и конденсатор?
8. Что такое «резонанс токов»? При каком условии он возникает?

Работа № 10. ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1. Цель работы – экспериментальное исследование частотных характеристик электрической цепи с последовательным соединением реактивных элементов.

2. Предварительное домашнее задание

2.1. Изучить тему «Частотные свойства электрических цепей», содержание данной лабораторной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы к ней.

2.2. Начертить принципиальные схемы исследуемых цепей с включенными измерительными приборами.

3. Порядок выполнения работы.

3.1. Собрать электрическую цепь с последовательным соединением элементов (рис. 1) и предъявить её для проверки преподавателю.

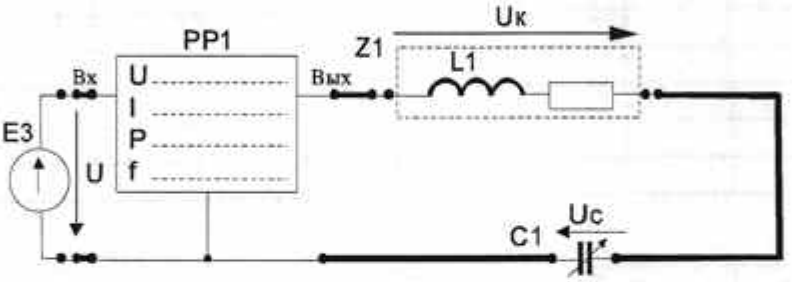


Рис. 1

3.2. Включить электропитание, установить на выходе генератора напряжение 5…6 В и изменяя частоту входного сигнала от 40 Гц до 400 Гц измерять входное напряжение U, активную мощность цепи P, ток в цепи I, напряжения на катушке индуктивности U_K, конденсаторе U_C, а также угол сдвига фаз φ между входным напряжением U и током I. При этом обеспечить значение частоты f_0 источника питания, при котором в цепи будет наблюдаться явление резонанса напряжений (угол сдвига фаз φ=0). Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить источник переменного напряжения.

Таблица 1

f, Гц									
U, В									
P, Вт									
I, А									
φ, град									
U_L, В									
U_C, В									
U_R, В									

3.3. По результатам измерений для каждого значения частоты входного сигнала рассчитать величину полного сопротивления цепи Z_{BX}, активного

сопротивления цепи R, полного сопротивления катушки индуктивности Z_K, реактивного сопротивления цепи X, индуктивного X_L и емкостного X_C реактивных сопротивлений, а также величину индуктивности L, емкости C и активного сопротивления цепи R. (табл. 2).

3.4. По результатам расчетов и измерений построить графики характеристик $I=F(f)$, $Z_{BX}=F(f)$, $U_K=F(f)$, $U_C=F(f)$, $\varphi=F(f)$.

3.5. Определить граничные частоты f_2 и f_1, а также резонансную частоту f_0. По найденным значениям частот вычислить добротность Q_1. Используя значения параметров элементов последовательной цепи вычислить добротность Q_2. Сравнить полученные значения добротности. Результаты расчетов занести в табл. 3.

Таблица 2

f, Гц									
Z_{BX}, Ом									
R, Ом									
Z_K, Ом									
X, Ом									
X_L, Ом									
X_C, Ом									
L, мГн									
C, мкФ									

Таблица 3

f_0, Гц	f_1, Гц	f_2, Гц	Q_1	Q_2

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

а) наименование и цель работы;

б) электрические схемы проведенных экспериментов;

в) таблицы с результатами эксперимента;

г) экспериментальные характеристики;

д) выводы о частотных свойствах исследованной цепи.

5. Контрольные вопросы

1. Почему при изменении частоты источника питания изменяется входное сопротивление цепи, содержащей реактивные элементы?

2. Что понимают под «резонансом» в электрической цепи переменного тока?

3. Построить векторную диаграмму напряжений в цепи с последовательным соединением R,L,C для режима резонанса с указанием вектора напряжения на реальной катушке индуктивности.

4. Изменением каких параметров в последовательной RLC-цепи, подключенной к источнику синусоидального сигналов можно получить резонансный режим?

5. Как можно определить значение резонансной частоты в цепях с последовательным и параллельным соединением элементов?

6. Как определяется добротность последовательной RLC-цепи и что она характеризует.

7. В последовательной R, L, C-цепи при резонансе известны приложенное напряжение U, напряжение на катушке U_K и напряжение на конденсаторе U_C. Почему добротность цепи, определенная как $Q_1=U_K/U$ и $Q_2=U_C/U$ получается различной? В каком случае больше?

7. Как влияет на добротность изменение активного сопротивления в последовательной цепи?

8. Как определяется полоса пропускания частот и что она характеризует?

Работа № 11. 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. Предварительное домашнее задание

2.1. Изучить тему «Нелинейные цепи переменного тока», содержание данной лабораторной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы к ней.

2.2. Начертить принципиальные схемы исследуемых цепей исследуемых цепей с включенными измерительными приборами.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

3.2. Для снятия вольтамперной характеристики катушки с сердечником собрать электрическую цепь по рис. 1. Подключить параллельно добавочному резистору *R2* выводы осциллографа. Изменяя от нуля величину выходного напряжения источника питания Е3 при частоте 50 Гц, снять вольтамперную характеристику катушки с ферромагнитным сердечником. 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.

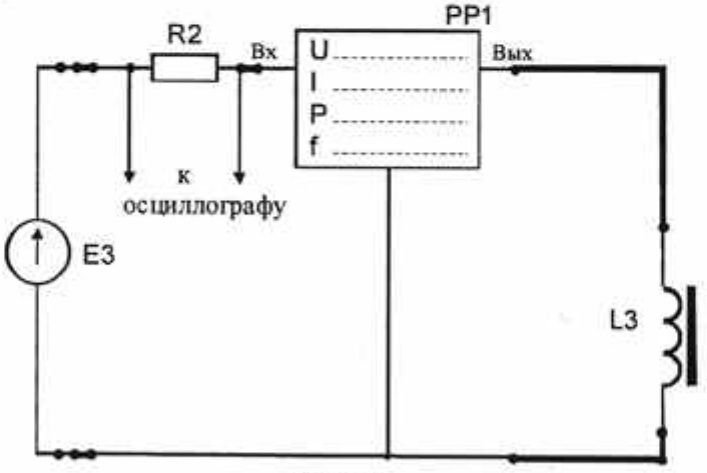


Рис. 1

Таблица 1

U, В							
I, А							

3.3. Для снятия вольтамперной характеристики конденсатора С3 подключить его вместо катушки индуктивности. Снять вольтамперную характеристику

конденсатора С3, изменяя выходное напряжение источника от нуля. Результаты измерений занести в табл. 2

Таблица 2

U_C, В							
I, 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 L3 и конденсатора С3 (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

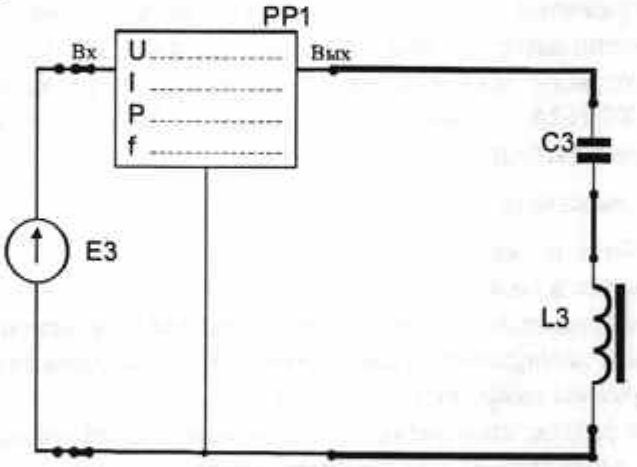


Рис. 2

Таблица 3

$U_{увел}$, В	0	2	4	6	8	10	12
$I_{увел}$, А							
$U_{умен}$, В	12	10	8	6	4	2	0
$I_{умень}$, 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. 3. Подключить параллельно двуханодному стабилитрону *VD2* осциллограф.

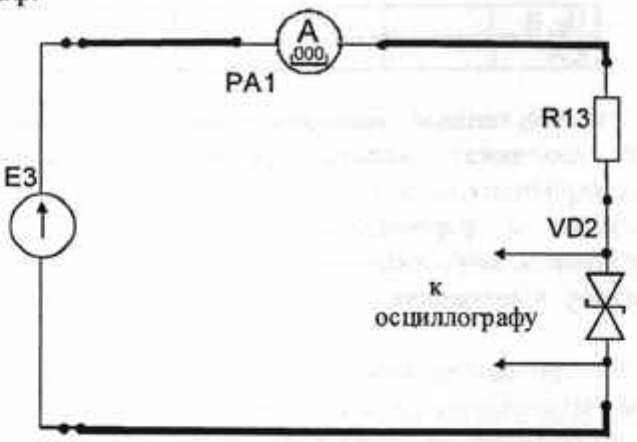


Рис. 3

Плавно увеличивая входное напряжение наблюдать по осциллографу форму выходного напряжения. Обратить внимание на величину тока, при котором начинается ограничение выходного напряжения. Измерить осциллографом амплитуду выходного напряжения и сравнить ее с паспортными данными стабилитрона КС162А. Зарисовать осциллограммы наибольшего входного и соответствующего выходного напряжений.

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.

Работа № 12. 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. Предварительное домашнее задание

2.1. Изучить тему «Трехфазные электрические цепи при соединении по схеме звезда», содержание данной лабораторной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы к ней.

2.2. Начертить принципиальные схемы исследуемых цепей исследуемых цепей с включенными измерительными приборами.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

3.2. Включить электропитание стенда. Включить трехфазный источник питания Е4 и измерить стрелочным вольтметром линейные и фазные напряжения источника питания на холостом ходу. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить источник электропитания. Проверить соотношение между линейными и фазными напряжениями источника питания.

Таблица 1

Измерено на клеммах источника питания						Вычислено		
Линейные напряжения			Фазные напряжения					
U_{AB}, В	U_{BC}, В	U_{CA}, В	U_A, В	U_B, В	U_C, В	$U_Л$, В	$U_Ф$, В	$U_Л/U_Ф$

3.3. Собрать симметричную четырехпроводную трехфазную электрическую цепь (рис. 1). В качестве амперметров использовать цифровые приборы в режиме измерения переменного тока (тумблер режима работы приборов в позиции «~»). В качестве потребителей R_A, R_B, R_C использовать резисторы R17, R18, R19, установив соответствующие тумблеры в позицию «1». Представить схему для проверки преподавателю.

3.4. Исследовать режимы работы симметричной трехфазной цепи при наличии и отсутствии нейтрального провода, а также влияние нейтрального провода и обрыва линейного провода заданной фазы (табл.2) на режим работы цепи. Для этого включить электропитание стенда, источник трехфазного напряжения Е2 и измерить токи, фазные напряжения источника, фазные напряжения на потребителях и напряжение смещения нейтрали U_{nN} в соответствующих режимах.

Результаты измерений занести в табл. 3. Выключить источник питания Е4.

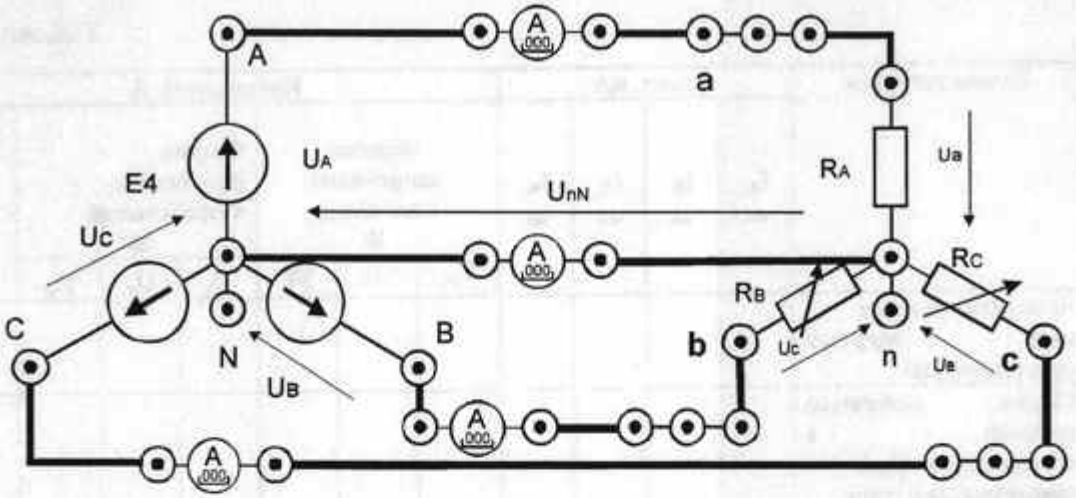


Рис. 1

3.5. Исследовать режимы работы несимметричной трехфазной цепи с активной нагрузкой при наличии и отсутствии нейтрального провода, а также влияние нейтрального провода и обрыва линейного провода заданной фазы на режим работы цепи. Для этого установить параметры цепи в соответствии с заданным вариантом (табл. 2), включить электропитание стенда, источник трехфазного напряжения E2 и измерить токи, фазные напряжения источника, фазные напряжения на потребителях и напряжение смещения нейтрали U_{nN}. Результаты измерений занести в табл. 3. Выключить источник питания E4.

Таблица 2

№ варианта	1	2	3	4	5	6
R_A	R18	R18	R18	R18	R18	R18
R_B	R17-2	R17-2	R17-3	R17-1	R17-2	R17-3
R_C	R19-1	R19-2	R19-2	R19-2	R19-3	R19-3
Обрыв провода	A	B	C	A	B	C

3.6. Исследовать режимы работы несимметричной четырехпроводной и трехпроводной цепи при неоднородной нагрузке, Для этого подключить в фазе «А» вместо резистора конденсатор С3, установить переключатели резисторов R17 и R19 в позицию «1», включить источник питания E2. Результаты измерений занести в табл. 3. Выключить источник питания E4.

3.7. Исследовать влияние сопротивления линии передачи на режим работы трехфазной цепи. Для этого включить последовательно в каждую фазу дополнительные резисторы R14, R15, R16, установить симметричную нагрузку, включить электропитание и измерить напряжения и токи. Результаты измерений занести в табл. 4.

Таблица 3

Режим нагрузки	Токи, мА				Напряжения, В						
	I_A, мА	I_B, мА	I_C, мА	I_N, мА	Фазные напряжения источника, В			Фазные напряжения потребителей, В			
					U_A	U_B	U_C	U_a	$U_в$	U_c	U_{nN}
Четырехпроводная цепь, нагрузка симметричная											
Обрыв линейного провода в четырехпроводной симметричной цепи											
Трехпроводная цепь, нагрузка симметричная											
Обрыв линейного провода в трехпроводной симметричной цепи											
Четырехпроводная цепь, нагрузка несимметричная однородная											
Трехпроводная цепь, нагрузка несимметричная однородная											
Обрыв линейного провода в трехпроводной несимметричной цепи											
Четырехпроводная цепь, нагрузка несимметричная неоднородная											
Трехпроводная цепь, нагрузка несимметричная неоднородная											

Таблица 4

U_A, В	U_B, В	U_C, В	U_a, В	$U_в$, В	U_c, В	I_A, мА	I_B, мА	I_C, мА	I_N, мА

3.8. По результатам измерений вычислить

- среднее значение линейных напряжений $U_Л$ источника питания;
- среднее значение фазных напряжений $U_Ф$ источника питания;
- отношение $U_Л/U_Ф$;
- среднее значение тока при симметричной нагрузке.

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

3.10. Сравнить режимы работы и сделать вывод о влиянии нейтрального провода на работу трехфазной системы 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) вывод о роли нейтрального провода в трехфазной цепи при соединении потребителя по схеме звезда;

ж) вывод о влиянии сопротивления линии передачи на работу трехфазной цепи.

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 № 13. 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. Предварительное домашнее задание

2.1. Изучить тему «Трехфазные электрические цепи при соединении по схеме треугольник», содержание данной лабораторной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы к ней.

2.2. Начертить принципиальные схемы исследуемых цепей исследуемых цепей с включенными измерительными приборами.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

3.2. Включить модуль питания стенда и источник трехфазного напряжения E4. Измерить линейные напряжения источника питания на холостом ходу. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить электропитание. Вычислить среднее значение линейного напряжения $U_Л$.

Таблица 1

U_{AB}, В	U_{BC}, В	U_{CA}, В	$U_Л$, В

3.3. В соответствии с рис. 1. собрать схему трехфазной цепи при соединении потребителей в треугольник. Установить симметричную нагрузку. Для этого установить соответствующие тумблеры в позицию «1». Предъявить схему для проверки.

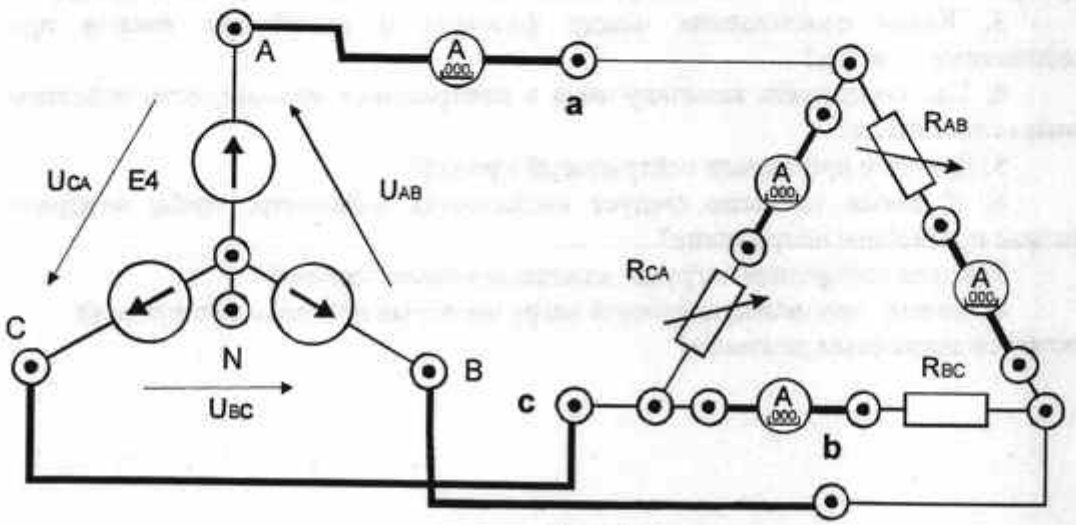


Рис. 1

3.4. Включить электропитание и источник трехфазного напряжения. Измерить фазные токи I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} и линейный ток I_A, а также напряжения на потребителях. Результаты занести в табл. 2. Выключить электропитание.

3.5. Разомкнуть линейный провод фазы «В» (убрать проводник) и измерить фазные токи I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} и линейный ток I_A, а также напряжения на потребителях. Результаты занести в табл. 2.

3.6. Выключить нагрузку в фазе потребителя «СА», убрав проводник, и провести измерения. Результаты занести в табл. 2.

3.7. Разомкнуть линейный провод фазы «В» и нагрузку в фазе потребителя «СА». Измерить фазные токи I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} и линейный ток I_A, а также напряжения на потребителях. Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

Режим нагрузки	Ток нагрузки, мА						Напряжение на потребителях, В		
	I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
Симметричная нагрузка									
Обрыв линейного провода «В»									
Обрыв фазы потребителя «АВ»									
Обрыв фазы потребителя «АВ» и обрыв линейного провода «В»									
Несимметричная нагрузка									

3.8. Установить в соответствии с заданным вариантом несимметричную нагрузку (табл. 3) и включив электропитание, провести измерения токов и напряжений.

Таблица 3

№ варианта	1	2	3	4	5	6
R_{AB}	R21-2	R21-2	R21-3	R21-3	R21-1	R21-3
R_{BC}	R22	R22	R22	R22	R22	R22
R_{CA}	R20-2	R20-3	R20-2	R20-3	R20-2	R20-1

3.9. Для всех опытов построить в масштабе векторные диаграммы.

3.10. По векторным диаграммам определить для исследованных режимов линейные токи I_B и I_C.

3.11. Сравнить результаты измерений линейных и фазных токов при соединении потребителя в треугольник для исследованных режимов.

3.12. Проанализировать влияние обрывов линейного и фазного проводов на режимы работы потребителей.

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

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

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?

8. Как повлияет обрыв линейного провода на режим работы потребителей при их соединении по схеме треугольник?

Учебные наглядные пособия и демонстрационные комплексы по дисциплинам

Теоретические основы электротехники
Электротехника и основы электроники
Электроника
Основы метрологии и электрические измерения
Электротехнические материалы
Основы электропривода
Автоматизированный электропривод
Электрические аппараты
Электрические машины
Электрооборудование промышленных и гражданских зданий
Монтаж и эксплуатация электрооборудования
Электроснабжение промышленных и гражданских зданий
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии
Эксплуатация электрических сетей и оборудования станций и подстанций
Автоматизация технологических процессов
Автоматизированные системы управления на основе микропроцессорных технологий

Просмотреть все комплекты наглядных пособий можно на сайте **www.Labstend.ru**

Электронные плакаты

Наглядные пособия на компакт-дисках предназначены для демонстрации при помощи интерактивной доски или мультимедийного проектора. Каждый диск содержит комплект плакатов по полному курсу выбранной дисциплины. Удобная программная оболочка имеет оглавление, позволяющее просмотреть необходимый плакат.

В помощь преподавателю для подготовки к занятиям прилагается печатное пособие.

Кодотранспаранты

Кодотранспаранты (фолии) предназначены для демонстрации при помощи оверхед-проектора (кодоскопа). Кодотранспаранты напечатаны на прозрачных пленках, уложены в защитные конверты и собраны в папки. Формат листа А4 (210 x 297 мм).

Каждый комплект кодотранспарантов разбит на разделы. Возможен выборочный заказ разделов или отдельных листов из комплекта.

Комплексное оснащение учебных аудиторий

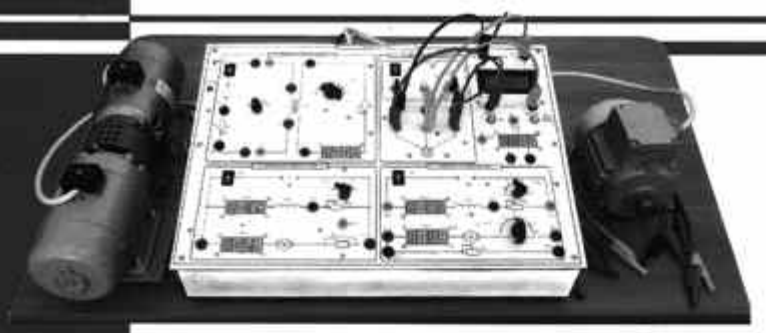
Как законченное решение качественного проведения занятий наглядные пособия могут поставляться в составе демонстрационных комплексов. В таблице приведен их состав.

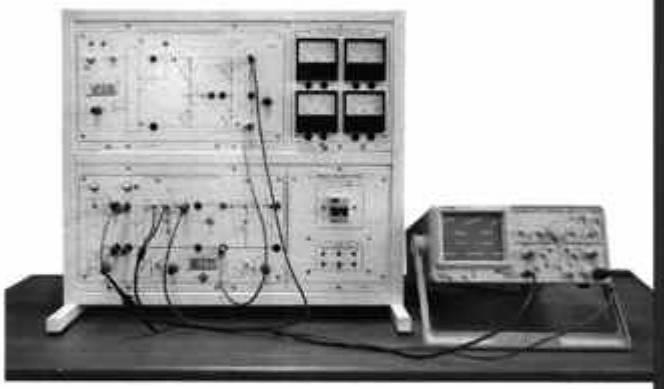
Состав	интерактивный	мультимедийный	классический
Интерактивная доска			•
Мультимедийный проектор		•	•
Экран	•	•	
Персональный компьютер, монитор		•	•
Кодоскоп	•		
Электронные плакаты на CD		•	•
Кодотранспаранты	•		

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76; тел./факс: (351) 729-90-11, 267-95-25; e-mail: Rnpo@susu.ac.ru; www.Labstend.ru

УЧТЕХ
профи

454080
г. Челябинск, а/я 12431
пр. Ленина, 83, оф. 506а
тел./факс: (351) 267-94-36
267-96-89
www.uralstend.ru
rzh@susu.ac.ru





Типовые учебные лабораторные комплексы для ВУЗОВ, ТЕХНИКУМОВ И УЧИЛИЩ

- *Проектирование*
- *Разработка*
- *Производство*
- *Доставка по всей России*
- *Пусконаладочные работы*
- *Сервисное обслуживание*

- *Электротехника*
- *Электроника и микропроцессорная техника*
- *Электромашины и электропривод*
- *Электроэнергетика*
- *Автоматизация*