

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. Шухова»**

Общая электротехника и электроника

Методические указания
к лабораторным работам
для студентов электрических и неэлектрических специальностей

Белгород 2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. Шухова»**

Кафедра электроэнергетики

Утверждено
научно-методическим советом
университета

Общая электротехника и электроника

Методические указания
к лабораторным работам
для студентов электрических и неэлектрических специальностей

Белгород 2012

УДК
ББК
О

Составитель *доцент Д.А. Прасол*
ст. преподаватель М.Ю. Михайлова

Рецензент проф. кафедры «Электроэнергетика», к.т.н. *А.А. Виноградов*

О **Общая электротехника и электроника** : методические указания к лабораторным работам для студентов электрических и неэлектрических специальностей/ сост. М.Ю. Михайлова, Д.А. Прасол. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012, 50 с.

Методические указания составлены в соответствии с программами обучения по дисциплине «Общая электротехника и электроника» и содержат лабораторные работы, как по цепям постоянного тока, так и по цепям переменного тока. Методические указания предназначены для студентов электрических и неэлектрических специальностей.

Издание публикуется в авторской редакции.

УДК
ББК

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2012

Введение

Одной из форм практического обучения являются лабораторные занятия, на которых студенты получают навыки работы с электротехническим оборудованием, электроизмерительными приборами.

Настоящие методические указания содержат описания общего цикла лабораторных работ по дисциплинам «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника» и предназначены для студентов всех неэлектрических специальностей. Указания составлены по единой схеме, содержат краткие теоретические сведения об исследуемом процессе, явлении или элементе, схему лабораторной установки, порядок выполнения работы и обработки результатов измерений, требований к содержанию отчета, контрольные вопросы.

Лабораторный практикум позволит студентам ознакомиться и научиться пользоваться электроизмерительными приборами, собирать и настраивать электрические цепи, снимать и обрабатывать показания приборов. Полученные знания помогут не только теоретически ознакомиться с исследуемыми процессами, явлениями и оборудованием, но и получить практические навыки и результаты, возможность использования в реальных условиях.

Цель и порядок выполнения работ

Лабораторные работы являются одним из видов практического обучения. Их цель – закрепление теоретических знаний, проверка на опыте некоторых положений теории и законов электротехники, приобретение практических навыков при сборке электрических цепей, проведении эксперимента, использовании основных электроизмерительных приборов и устройств.

Подготовка к лабораторным работам

Серьезное отношение к лабораторной работе позволит студенту сделать правильные выводы, проанализировать результаты опытов, научиться самостоятельно решать некоторые несложные задачи исследовательского характера. Задание на проведение очередной лабораторной работы выдается заблаговременно до ее выполнения. Для качественного выполнения лабораторной работы студенту необходимо:

- повторить теоретический материал по конспекту, учебнику или методическому пособию;
- ознакомиться с описанием лабораторной работы;
- записать название и номер работы, цель работы, краткие теоре-

тические сведения, вычертить электрические схемы и таблицы для записи показаний приборов и результатов расчета;

- выяснив цели работы, четко представить себе поставленную задачу и способы ее достижения, оценить ожидаемые результаты опытов;
- сделать предварительный домашний расчет, если это указано в задании;
- ответить письменно или устно на контрольные вопросы.

Ознакомление с электроизмерительными приборами и устройствами и их подбор. Прежде чем приступить к сборке электрической цепи, следует выбрать необходимые электроизмерительные приборы. В описании каждой лабораторной работы дан перечень физических величин, которые подлежат измерению. При выборе приборов нужно учитывать их тип, номинальные значения измеряемой величины, род тока, класс точности. Погрешности измерения любого прибора тем меньше, чем ближе измеряемая величина к предельному значению, указанному на приборе. Поэтому предпочтительнее пользоваться приборами, у которых во время измерения стрелка будет находиться во второй половине шкалы.

Включение измерительных приборов в цепь может вызывать заметное изменение токов, напряжений, мощностей. Поэтому для более точных измерений следует учитывать внутренние сопротивления приборов, которые обычно указаны на их шкалах или в паспортах.

В настоящее время широко используются цифровые приборы, хотя возможно применение и аналоговых (стрелочных) приборов.

Стрелочные приборы магнитоэлектрической системы используют только для измерения на постоянном токе, а прибор электромагнитной, электродинамической, электронной могут работать как на постоянном, так и на переменном токе в диапазоне частот, указанных на шкалах.

Прежде чем приступить к измерениям следует определить цену деления стрелочного прибора. Цена деления амперметров и вольтметров может быть рассчитана как частное от деления предела прибора, указанного на переключателе на число делений шкалы.

При использовании цифровых приборов необходимо установить вид измеряемой величины (постоянный или переменный ток, постоянное или переменное напряжение, сопротивление и т.д.), а также возможный предел её измерения. Подключить измерительные щупы или провода к соответствующим выводам прибора.

Для изучения быстроизменяющихся процессов в электрических цепях применяют электронный осциллограф. Правила эксплуатации этого прибора даются в специальном руководстве, которое следует изучить перед работой.

Как в производственных испытаниях, так и в учебных опытах в отчете необходимо описать используемые измерительные приборы. Следует записать их названия, номинальное значение, тип, род тока, частоту, класс точности, принцип действия (систему), способ установки и заводской номер. Это позволяет, если возникнет потребность, повторить опыт с теми же приборами и проверить правильность полученных результатов.

Сборка электрической цепи. Собирать схему должен только один человек, другие члены бригады контролируют его, подают нужные провода, выполняют мелкие поручения. Необходимо, чтобы обязанности членов бригады менялись. Перед сборкой необходимо условиться о клеммах «начала» и «конца» прибора, например, входной клеммой реостата можно считать левую, а выходной – правую. Если же имеется обозначение зажимов «+» и «-», то входом считается положительный зажим. Это правило в значительной мере предупредит от ошибок и упростит проверку цепи. В первую очередь следует собирать последовательную (токовую) часть цепи, к которой затем подключаются параллельные ветви, если они имеются в схеме. Слаботочные ветви, состоящие из вольтметров, параллельных обмоток ваттметров, осциллографов и т.п. собираются в последнюю очередь.

Наличие ошибок в цепи может привести к порче приборов и оборудованию или к несчастному случаю, поэтому каждый раз собранную цепь необходимо показать руководителю для проверки.

Включение цепи и определение неисправностей. Для обеспечения минимального тока в цепи, перед ее включением движки реостатов следует установить в такое положение, в котором их сопротивление максимально. Переключатели многопредельных приборов установить на высший предел, рукоятки регуляторов напряжения, установить на нулевую отметку. Проверить и при необходимости с помощью корректора установить все стрелки приборов на нулевую отметку.

После схему включают и наблюдают за показаниями приборов, медленно регулятором увеличивают напряжение на входе схемы до нужного значения. Если стрелка амперметра не отклоняется, это означает, что в неразветвленной части цепи имеется обрыв или неправильно включен прибор. Если стрелка амперметра даже при малом напряжении отклоняется до конца или срабатывает автоматический выключатель – это указывает на короткое замыкание в цепи. В этих случаях источники питания следует отключить и еще раз проверить цепь или обратиться за помощью к преподавателю.

Иногда, даже при правильно собранной цепи ток отсутствует во всей цепи или в отдельной ее части. В этом случае следует найти обрыв, который может быть на контактах, соединительных проводах, амперметре

или нагрузке. Для отыскания неисправностей можно воспользоваться, например, таким способом. После включения цепи вначале проверяется вольтметром наличие напряжения на зажимах источника, затем поочередно подключаются зажимы вольтметра к началу и концу каждого провода, амперметра и реостатов. Если напряжение на контролируемом участке (за исключением реостата) окажется не равно нулю, то это означает, что обрыв произошел на данном участке. Такой способ не выявляет двойного обрыва, но исключает короткое замыкание в случае неправильных действий с прибором и позволяет определить обрыв внутри реостата. Двойной обрыв можно отыскать предлагаемым способом после устранения найденного первого обрыва.

Проведение опыта. При исправной цепи можно приступать к проведению опытов. Вначале выполняют все действия, предусмотренные программой работы, но без записей результатов. Такое опробование необходимо, поскольку дает возможность убедиться в том, что приборы выбраны правильно, а если есть необходимость, можно их заменить на более подходящие.

Во время проведения эксперимента обязанности в бригаде лучше разделить: один человек измерит напряжение, сопротивление и т.п. и наблюдает за приборами, другой – записывает результаты в подготовленную заранее таблицу. В последующих работах обязанности членов бригады меняются.

В ходе проведения эксперимента измеряемая величина должна фиксироваться равномерно по всему своему диапазону изменения, включая начальную, конечную и точку экстремума, если последняя существует. Показания приборов нужно снимать внимательно и записывать карандашом. Если сразу трудно определить измеряемые значения в именованных единицах, то можно зафиксировать количество делений шкалы прибора, а после окончания опыта пересчитать их в именованные единицы. После эксперимента нужно проанализировать полученные результаты и проверить правильность отсчета измеренных значений: 1) по закону Кирхгофа; 2) балансу мощностей; 3) другим теоретическим формулам.

Не торопитесь разбирать цепь, покажите вначале свои результаты преподавателю, так как может быть придется переделать работу заново.

Составление отчета. Защита лабораторной работы. Отчет является документом о проделанном эксперименте, поэтому в нем должны содержаться все необходимые сведения для проверки результатов опыта и расчета. Составление отчета – индивидуальная работа каждого члена бригады. Отчет выполняется чернилами (пастой). Текст должен быть написан четким, понятным почерком. Схемы, таблицы, графики и другие построения выполняются карандашом с применением чертежного инструмента, специальных шаблонов или на компьютере. При начертании

электрических схем должны соблюдаться требования ГОСТов на графические и буквенные обозначения их элементов (см. приложение). В одной системе координат можно изображать несколько кривых различая их, например, по цвету.

Масштаб на графиках предпочтительно выбирать равным 1×10^n , 2×10^n , 5×10^n . Математическую обработку экспериментальных данных проводят в отчете полностью или частично, но в любом случае обязательно указывают расчетные формулы. Не исключено, что опытные и расчетные данные не совпадут на $5 \div 10$ %. Это возможно из-за колебаний напряжения в сети, погрешности при измерениях, нестабильности параметров цепи. Такие отклонения считаются допустимыми.

В заключение работы делается вывод по выполнению задач, указанных в цели работы, подтверждении опытным путем тех законов, правил и формул, которые изучались в теоретическом курсе. Выводы должны быть конкретными с приведением конкретных числовых значений.

Каждая работа должна быть защищена студентом. В ходе защиты студент должен показать знания теории по теме работы, умение собирать цепь, рассказать ход лабораторной работы, пояснить, как проводился расчет, уметь проанализировать полученные результаты и объяснить причины расхождения расчетных и опытных данных. Так же защита лабораторных работ может осуществляться путем решения студентом задач на тематику соответствующей работы. Защита лабораторных работ проводится систематически в течение учебного семестра, как правило, на следующем лабораторном занятии, назначенном преподавателем или в конце семестра после выполнения всех лабораторных работ.

Основные правила безопасности при работе в электрических лабораториях. Согласно Правилам устройств электроустановок (ПУЭ) для помещений без повышенной опасности поражения током, к которым относятся лаборатории электротехники, безопасным считается напряжение переменного тока частотой 50 Гц до 42 В. Сопротивление тела человека определяется сопротивлением кожного покрова и равно примерно 200-500 кОм. В расчетах по электробезопасности сопротивление тела человека принимают равным 1000 Ом. Увлажнение или повреждение кожи снижает сопротивление до 600–800 Ом. Большое влияние на сопротивление тела оказывает также общее состояние организма нервной системы. Таким образом, при нормальных условиях при напряжении 42 В по телу человека будет протекать ток $0,1 \div 0,3$ мА. Величина тока в 50 мА может привести к электротравме, а в 100 мА – смертельному исходу. Случается, что при токах даже меньше 50 мА мышцы кистей рук непроизвольно сокращаются и токоведущая часть может оказаться зажатой в кулаке, при этом самостоятельно не удается разжать кисть руки и прервать ток через тело.

В лабораториях электротехники используются напряжения до 250 В, поэтому меры предосторожности следует соблюдать особенно тщательно.

Основные правила по технике безопасности следующие:

1. Перед началом сборки цепи следует убедиться, что выключатель находится в выключенном состоянии, а вилки вынуты из штепсельных разъемов. То есть, все оборудование должно быть обесточено и отключено от источников электрической энергии.

2. Не допускается использование приборов и аппаратов с неисправными клеммами, проводов с поврежденной изоляцией, неисправных реостатов и т.п.

3. Перед тем как, присоединить конденсатор, его необходимо разрядить, замкнув выводы проводником накоротко.

4. Собранную цепь включают, только проверив схему и получив разрешение руководителя занятия.

5. Пред включением цепи следует убедиться, что никто не прикасается к открытым токоведущим частям.

6. Все необходимые вносимые в схему изменения нужно производить только при снятом напряжении.

7. Запрещается самостоятельно производить какие-либо переключения на главном распределительном щите лаборатории, за исключением случаев экстренного отключения.

8. Если во время проведения опытов возникают повреждения, появляется дым, специфический запах горячей изоляции или накаляются реостаты – следует быстро отключить напряжение и сообщить преподавателю о случившемся.

9. Если кто-либо попадает под напряжение и не сможет самостоятельно оторваться от токоведущих частей, то не пытайтесь оттащить его – вы сами будете поражены током. Быстро выключите напряжение на стенде или главном распределительном щите. Сообщите преподавателю о случившемся.

Студентов допускают к лабораторным работам после ознакомления с настоящими правилами, что должно быть зафиксировано в специальном журнале присвоения 1-ой группы по электробезопасности (в журнале по технике безопасности).

Лабораторная работа № 1 **Проверка амперметра и вольтметра**

Цель работы: ознакомиться с устройством электроизмерительных приборов. Ознакомиться с видами погрешностей. Получить практические навыки по определению погрешностей электроизмерительных приборов.

Основные понятия и определения

При любом измерении результат отличается от истинного значения величины вследствие наличия погрешностей. Погрешность прибора определяет степень близости от показаний к действительному значению измеряемой величины, которое при изменениях всегда остается неизвестным. За действительное значение измеряемой величины A_0 принимают ее значение, полученное при измерении образцовым прибором.

Разность между показаниями прибора $A_{из}$ и действительным значением измеряемой величины A_0 называется абсолютной погрешностью ΔA , имеющей размерность измеряемой величины.

$$\Delta A = A_{из} - A_0.$$

Абсолютная погрешность, взятая с обратным знаком, представляет собой поправку K .

$$K = - \Delta A.$$

Поправка есть та величина, которую следует алгебраически прибавить к показаниям прибора, чтобы получить действительное значение измеряемой величины.

Погрешность измерений оценивается также относительной погрешностью γ_0 . Относительная погрешность γ_0 представляет отношение модуля абсолютной погрешности $|\Delta A|$ к действительному значению A_0 измеряемой величины.

$$\gamma_0 = \frac{|\Delta A|}{A_0} \cdot 100\%.$$

Степень точности прибора определяют приведенной погрешностью, которая представляет отношение модуля абсолютной погрешности $|\Delta A|$ к наибольшему значению шкалы прибора (пределу измерения прибора) A_n .

$$\gamma_0 = \frac{|\Delta A|}{A_n} \cdot 100\%.$$

Приборы непосредственной оценки по степени точности делятся на восемь классов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4. Класс точности обозна-

чает наибольшую основную приведенную погрешность прибора, выраженную в процентах.

При эксплуатации могут иметь место износ отдельных частей прибора и разного рода повреждения. Это приводит к появлению недопустимо больших погрешностей при измерениях, поэтому необходимо периодически поверять приборы во время их эксплуатации. Поверку производят органы Государственной и ведомственной метрологической службы.

Поверка – это определение погрешностей прибора и установление его пригодности к применению. Она включает в себя внешний осмотр поверяемого прибора, выбор образцового прибора, поверку показаний прибора и оформление документов. Внешний осмотр прибора имеет целью выявить дефекты, препятствующие дальнейшему применению прибора, например, повреждение стекла, корректора, стрелки или наличие отсоединившихся деталей и т.д.

Прибор, на основе показаний которого поверяется исследуемый прибор, называется образцовым. Образцовый прибор выбирают по роду тока, по номинальным значениям величин к классу точности. Верхний предел измерения образцового прибора должен быть близок к верхнему пределу поверяемого прибора, а приведенная погрешность, по крайней мере, в 3 раза меньше приведенной погрешности поверяемого.

Поверку технических приборов производят путем сравнения их показаний с показаниями образцовых приборов.

Регулировку тока или напряжения следует вести так чтобы, показания поверяемого прибора сначала постепенно увеличивались до номинального, а затем плавно уменьшались до нуля. При этом стрелку поверяемого прибора необходимо точно устанавливать на основные деления шкалы и производить запись показаний обоих приборов (поверяемого и образцового).

Для поверки амперметра и вольтметра собирают схемы в соответствии с рисунками 1.1, 1.2 или 1.3.

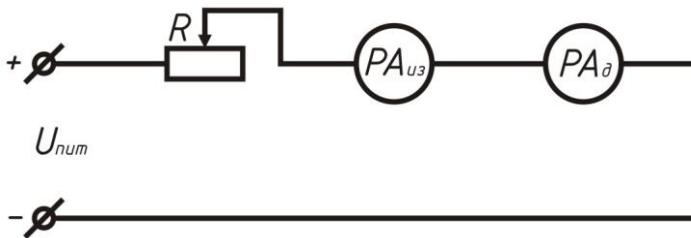


Рисунок 1.1. Схема установки для поверки амперметра

Проверку амперметра производят при постоянном напряжении сети, регулируя ток в электрической цепи путем изменения сопротивления потенциометра.

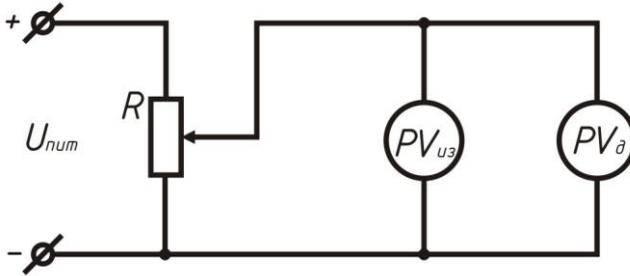


Рисунок 1.2. Схема установки для проверки вольтметра с нерегулируемым источником питания

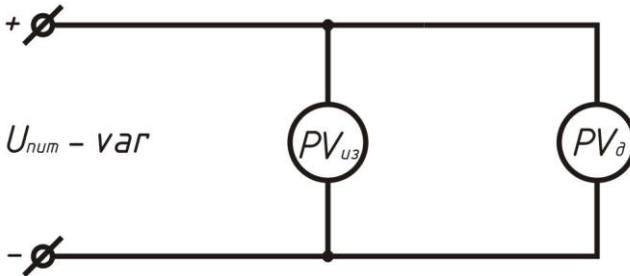


Рисунок 1.3. Схема установки для проверки вольтметра с регулируемым источником питания

Порядок выполнения работы

1. Подобрать приборы и оборудование.
2. Собрать электрическую схему установки согласно рисунку 1.1.
3. Произвести проверку амперметра. Результаты измерений занести в таблицу 1.1.
4. Собрать электрическую схему согласно рисунку 1.2 при нерегулируемом источнике питания или схему согласно рисунку 1.3 при регулируемом источнике.
5. Произвести проверку вольтметра, результаты измерений свести в таблицу 1.2.

6. Выполнить расчет основных погрешностей, результаты вычислений занести в таблицы 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1

Результаты поверки амперметра

№ п/п	Показания прибора				Погрешности		Поправка К
	Поверяе- мого	Образцового			Абсолют- ные	Приве- денные	
		ход вверх	ход вниз	среднее значение			
	А	А	А	А	А	%	А
1							
2							
...							
n							

Таблица 1.2

Результаты поверки вольтметра

№ п/п	Показания прибора				Погрешности		Поправка К
	Поверяе- мого	Образцового			Абсолют- ные	Приве- денные	
		ход вверх	ход вниз	среднее значение			
	В	В	В	В	В	%	В
1							
2							
...							
n							

7. По данным опытов к расчетным данным построить графики зависимости поправок от показаний поверяемого прибора.

8. Дать заключения о поверяемых приборах, сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое класс точности прибора?
2. Какие погрешности существуют у электроизмерительных приборов?
3. Что такое поверка?
4. Что такое «ход вверх» и «ход вниз»?
5. Назовите условия выбора образцового прибора?
6. Назовите преимущества и недостатки приборов магнитоэлектрической системы.
7. Почему прибор магнитоэлектрической системы не пригоден для измерения в цепях переменного тока?
8. Приборы, какой системы могут работать только на переменном токе?
9. Как расширить предел измерения амперметра?
10. Как расширить предел измерения вольтметра?
11. Как в электрическую цепь включается амперметр и каково его внутреннее сопротивление?
12. Как в электрическую цепь включается вольтметр, каким должно быть его внутреннее сопротивление?

Лабораторная работа № 2

Проверка основных законов электрических цепей

Цель работы: экспериментально найти распределение токов и напряжений, а также сопротивления отдельных элементов и всей цепи при последовательном, параллельном и смешанном соединении потребителей; убедиться в справедливости закона Ома и законов Кирхгофа.

Основные понятия и определения

В электротехнике приняты условные положительные направления напряжения U , тока I и ЭДС E , которые на схемах указываются стрелками.

За положительное направление напряжения принимают напряжение от точки с большим потенциалом к точке с меньшим. Если, например, потенциал точки a больше потенциала точки b ($\varphi_a > \varphi_b$), то напряжение направлено от a к b (рисунок 2.1).

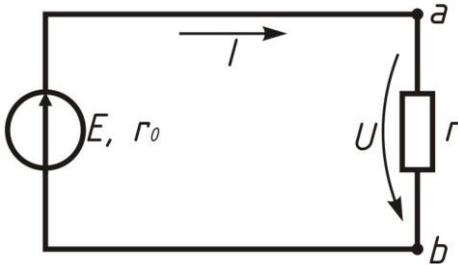


Рисунок 2.1. Простая электрическая цепь с одним источником ЭДС

За положительное направление тока на участке цепи без источника принято также направление от точки с большим потенциалом к точке с меньшим. На указанном участке цепи положительное направление цепи и напряжение совпадают. Положительным направлением ЭДС источника является напряжение от точки с меньшим потенциалом к точке с большим внутри источника. Большой потенциал обозначается (+), меньший (-).

Для того чтобы в электрической цепи установить положительные направления ЭДС напряжений токов, следует воспользоваться вольтметром магнитоэлектрической системы. Как известно, подвижная часть этого прибора отклоняется вправо, когда зажим прибора, обозначенный знаком (+), присоединен к точке электрической цепи с большим потенциалом, а зажим, обозначенный знаком (-), к точке с меньшим потенциалом.

Направление тока легко определить, если учесть, что в резисторе направления тока и напряжения совпадают.

Соотношения между токами, напряжениями ЭДС и с сопротивлениями в электрических цепях определяются законами Ома и Кирхгофа. С помощью этих законов может быть произведен расчет режима работы любой электрической цепи.

Закон Ома. На участке электрической цепи, не содержащем источника ЭДС (рисунок 2.1.), сила тока I цепи прямо пропорциональна напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению данного участка R .

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.1)$$

Величина $I \cdot R$ называется также падением напряжения на резисторе R .

Напряжение и ЭДС источника энергии. По закону Ома для полной цепи (рисунок 2.1.) сила тока прямо пропорциональна ЭДС E и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи ($R + r_0$):

$$I = \frac{E}{R + r_0},$$

где r_0 – внутреннее сопротивление источника. Это же выражение может быть записано в виде:

$$E = I \cdot R + I \cdot r_0 = U + I \cdot r_0 \quad (2.2)$$

т.е. напряжение источника меньше его ЭДС на величину падения напряжения на его внутреннем сопротивлении.

Выражение:

$$U = E - I \cdot r_0$$

называется внешней характеристикой источника ЭДС.

Из полученного для U выражения видно, что с увеличением тока напряжение на зажимах источника, вследствие большего внутреннего падения напряжения, уменьшается. Когда источник отключен от внешней цепи (холостой ход), $I = 0$, напряжение на его зажимах равно ЭДС.

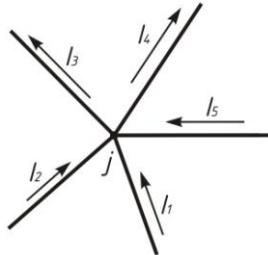


Рисунок 2.2. Узел электрической цепи

Первый закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма силы токов ветвей, сходящихся в узле j равна нулю

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0, \quad (2.4)$$

где n – число ветвей, подходящих к узлу j .

Токи, втекающие в узел, условно считаются отрицательными, а токи, вытекающие из узла – положительными. Для узла j (рисунок 2.2) можно записать:

$$-I_1 - I_2 + I_3 + I_4 - I_5 = 0.$$

Второй закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма падений напряжения в ветвях любого замкнутого контура электрической цепи равна сумме э.д.с. источников энергии, действующих в этом контуре.

Перед составлением уравнения по второму закону Кирхгофа необходимо произвольно выбрать направление обхода контура. Затем включить в сумму со знаком (+) все э.д.с. и токи, направления которых совпадают с направлением обхода контура, а со знаком (–) те – направления, которых противоположны направлению обхода контура.

$$\sum_{i=1}^n I_i \cdot r_i = \sum_{i=1}^m E_i. \quad (2.5)$$

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контура $a \delta \nu z a$ (рисунок 2.3). На схеме условно внутренние сопротивления и э.д.с. источников энергии показаны раздельно. Пусть обход контура совпадает с направлением движения часовой стрелки. Тогда по второму закону Кирхгофа имеем:

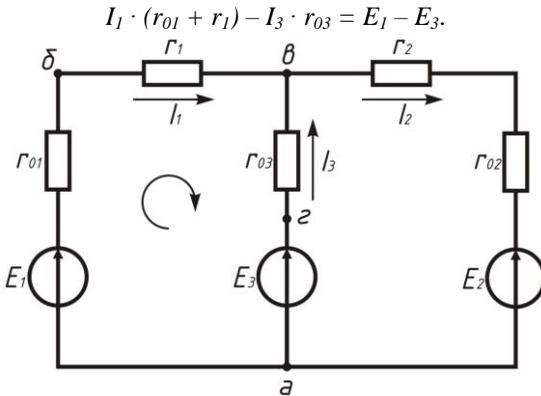


Рисунок 2.3. Сложная электрическая цепь

Определение эквивалентного сопротивления и преобразование электрических цепей. Сопротивления в электрических цепях могут быть включены последовательно, параллельно, смешанно или по более сложным схемам. Расчет цепей упрощается при замене нескольких сопротивлений одним эквивалентным, а также при других преобразованиях. Рассмотрим свойства различных способов соединения сопротивлений.

Последовательным называется такое соединение, при котором во всех включенных резисторах сила тока одна и та же (рисунок 2.4).

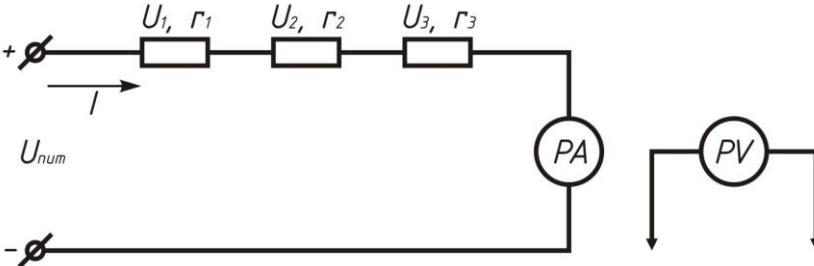


Рисунок 2.4. Последовательное соединение резисторов

На основании второго закона Кирхгофа можно записать, что общее напряжение цепи равно сумме падений напряжений на отдельных ее участках:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

или

$$I \cdot r_{\text{экв}} = I \cdot r_1 + I \cdot r_2 + I \cdot r_3,$$

откуда

$$r_{\text{экв}} = r_1 + r_2 + r_3.$$

Таким образом, общее сопротивление цепи равно арифметической сумме сопротивлений отдельных участков.

Цепь с любым числом последовательно включенных резисторов можно заменить цепью с одним эквивалентным резистором $r_{\text{экв}}$.

Приемники электрической энергии, включенные последовательно, работают нормально, т.е. находятся под номинальным напряжением U_n когда они все имеют один и тот же номинальный ток I_n , а напряжение источника питания равно сумме их номинальных напряжений. В этом случае приемники, имеющие большую номинальную мощность, находятся под большим напряжением, так как они имеют большое сопротивление.

Последовательно можно включать, в частности: одинаковые приемники, если напряжение источника равно произведению числа приемни-

ков на их номинальное напряжение. При выходе из строя одного приемника прекращается работа всех приемников. Поэтому применяется она сравнительно редко.

Параллельным называется такое соединение, при котором к одной паре узлов может присоединяться несколько ветвей. При этом все включенные в цепь приемники находятся под одним и тем же напряжением (рисунок 2.5). В этом случае они присоединены к двум узлам цепи, и на основании первого закона Кирхгофа можно записать, что общий ток равен алгебраической сумме токов параллельных ветвей, т.е.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

или

$$\frac{U}{r_{\text{экв}}} = \frac{U_1}{r_1} + \frac{U_2}{r_2} + \frac{U_3}{r_3},$$

откуда

$$\frac{1}{r_{\text{экв}}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}. \quad (2.6)$$

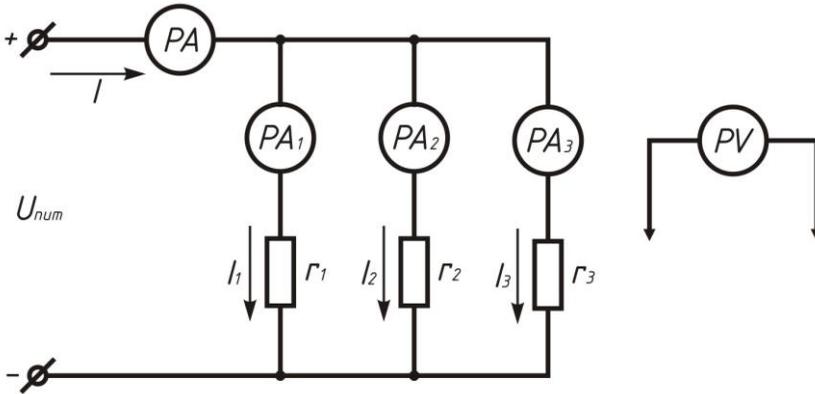


Рисунок 2.5. Параллельное соединение резисторов

Три параллельно включенных резистора цепи и можно заменить одним эквивалентным, согласно формуле (2.6):

$$r_{\text{экв}} = \frac{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3}{r_1 \cdot r_2 + r_2 \cdot r_3 + r_1 \cdot r_3}.$$

При двух параллельно включенных резисторах:

$$r_{\text{экв}} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}.$$

Из соотношения (2.6) следует, что общая проводимость цепи равна арифметической сумме проводимостей отдельных ветвей:

$$g_{\text{экв}} = g_1 + g_2 + g_3,$$

где $g_{\text{экв}} = \frac{1}{r_{\text{экв}}}.$

По мере роста числа включенных приемников проводимость цепи возрастает, а общее сопротивление уменьшается. Если параллельно включены n одинаковых приемников, то общее сопротивление равно сопротивлению одного из них, деленному на n .

Напряжение цепи:

$$U = I \cdot r_{\text{экв}} = I_1 \cdot r_1 = I_2 \cdot r_2 = I_3 \cdot r_3.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2}{r_1},$$

т.е. ток в цепи распределяется между параллельными ветвями обратно пропорционально их сопротивлениям. Включение по этой схеме приемников любой мощности рассчитано на одно и то же номинальное напряжение. Причем включение или отключение одного или нескольких приемников не отражается на работе остальных. Это обуславливает высокую надежность и гибкость схемы параллельного соединения, поэтому в электротехнике она является основной.

Смешанным называется такое соединение, при котором в цепи имеются группы параллельно и последовательно включенных приемников (рисунок 2.6)

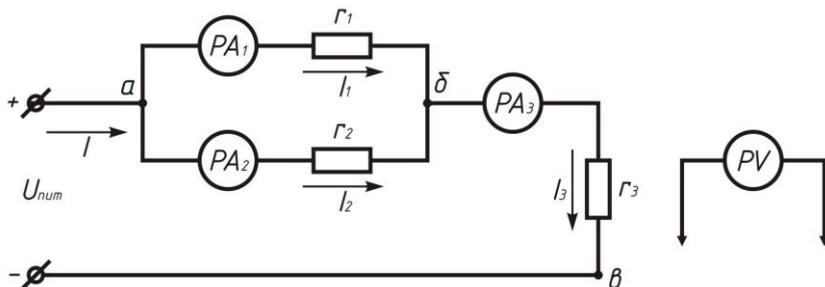


Рисунок 2.6. Смешанное соединение резисторов

Эквивалентное сопротивление в этом случае равно сумме сопротивлений отдельных последовательно включенных участков цепи. Для цепи, представленной на рисунке 2.6.

$$r_{\text{эkv}} = r_{\text{аб}} + r_{\text{бв}} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} + r_3.$$

Очевидно, что в этом случае можно перейти к эквивалентной схеме с одним резистором. Напряжения и токи резисторов определяются на основании соотношения последовательного и параллельного соединения.

Включение приемников по этой схеме осуществляют крайне редко, лишь тогда, когда ни параллельное, ни последовательное соединение не обеспечивает нормальное питание приемников от источника.

Порядок выполнения работы

1. Собрать поочередно электрические схемы в соответствии с рисунками 2.4, 2.5 и 2.6 и произвести измерения величин токов и напряжений. Результаты измерений записать в таблицу 2.1. В качестве приемников энергии использовать блоки резисторов, одни и те же для всех трех схем, не изменяя их сопротивлений. При этом подобрать значения сопротивлений так, чтобы максимальный ток в электрической цепи не превышал предела измерения амперметра.

2. Согласно измеренным величинам токов и напряжений, вычислить значение сопротивления каждого резистора и эквивалентное сопротивление каждой цепи относительно зажимов источников энергии, используя закон Ома для участка цепи. Полученные результаты свести в таблицу 2.1.

3. Вычислить, исходя из величин r_1 , r_2 , r_3 эквивалентное сопротивление $r_{\text{эkv}}$ каждой из цепей по соответствующей формуле. Сравнить полученные результаты с опытами.

4. Вычислить аналитическую силу токов в приемниках для всех трех схем, считая известными сопротивления приемников и напряжение источника питания. Полученные токи сравнить с измеренными.

5. Выполнить проверку законов:

- для последовательного соединения – второго закона Кирхгофа;
- для параллельного соединения – первого закона Кирхгофа;
- для смешанного соединения – первого и второго закона Кирхгофа.

6. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какое соединение резисторов называется последовательным?
2. Чему равно эквивалентное сопротивление цепи с последовательно включенными резисторами?
3. При каких условиях применяется последовательное включение резисторов (приемников)?
4. Какое соединение резисторов называется параллельным?
5. Как определить для параллельного соединения эквивалентное сопротивление и эквивалентную проводимость?
6. При каких условиях можно включать параллельно приемники электрической энергии?
7. Почему схема параллельного включения приемников является основной?
8. Какое соединение резисторов называется смешанным?
9. Как определить для смешанного соединения эквивалентное сопротивление?
10. Что такое проводимость и в каких единицах она измеряется?
11. Что такое ветвь электрической цепи?
12. Что такое узел электрической цепи?
13. Запишите выражение для эквивалентного значения сопротивления двух последовательно соединенных и двух параллельно соединенных резисторов.

Лабораторная работа № 3

Цепь переменного синусоидального тока с последовательным соединением катушки и конденсатора. Резонанс напряжений

Цель работы: изучить явления, происходящие в неразветвленных цепях переменного синусоидального тока при изменении соотношений величин индуктивности и емкости; ознакомиться с явлением резонанса напряжений.

Основные понятия и определения

Резонанс напряжений – это явление, возникающее в цепи переменного синусоидального тока при последовательном соединении индуктивных и емкостных элементов, в случае, когда полное реактивное сопротивление цепи равно нулю.

Рассмотрим процессы в цепи с последовательным соединением катушки и конденсатора (рисунок 3.1).

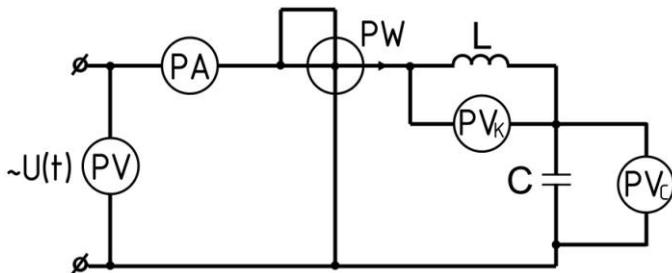


Рисунок 3.1. Последовательное соединение катушки и конденсатора

Реальная катушка обладает индуктивным сопротивлением $X_L = \omega L$ и активным сопротивлением R , где ω – угловая частота переменного тока, L – индуктивность катушки. При прохождении тока через катушку, электрическая энергия расходуется на нагревание провода катушки. Скорость преобразования электрической энергии в тепловую учитывается с помощью величины, называемой активной мощностью $P = R \cdot I^2$. В цепи постоянного тока катушка обладает только активным сопротивлением, так как угловая частота $\omega = 2\pi f = 0$ и $X_L = \omega L = 0$. Поэтому

$$R = \frac{U}{I},$$

где U – постоянное напряжение, приложенное к катушке, а I – сила постоянного тока, протекающего через катушку.

Эквивалентная схема замещения катушки может быть представлена в

виде последовательного соединения резистивного и индуктивного идеальных элементов (рисунок 3.2).

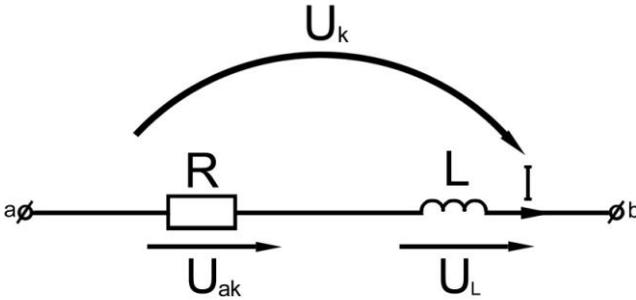


Рисунок 3.2. Эквивалентная схема замещения катушки

Напряжение на катушке U_k можно разложить на две составляющие – активную $U_{ак}$ и индуктивную U_L . Векторная диаграмма напряжений и тока для катушки приведена на рисунке 3.3.

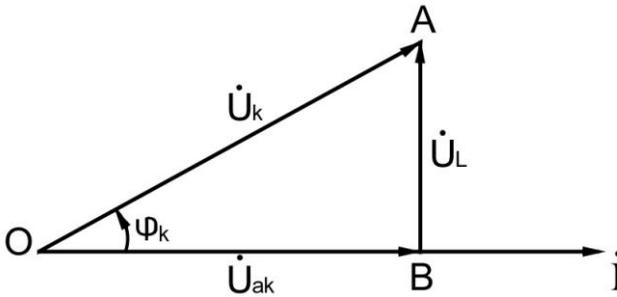


Рисунок 3.3. Векторная диаграмма напряжения и тока для катушки

Напряжение U_k можно измерить на выводах катушки с помощью вольтметра, ток I – с помощью амперметра. Угол сдвига фаз между током и напряжением катушки φ_k можно определить из формулы:

$$P_k = U_k \cdot I \cdot \cos \varphi_k,$$

если измерить с помощью ваттметра активную мощность катушки P_k . Составляющие напряжения U_k , U_L и $U_{ак}$ можно вычислить из треугольника напряжений OAB (рисунок 3.3): $U_{ак} = U_k \cdot \cos \varphi_k$ или определить графически, опустив перпендикуляр из конца вектора U_k (точка A на рисунке 3.3) на линию вектора I .

Конденсатор в цепи переменного тока обладает емкостным сопро-

тивлением $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$, где C – емкость конденсатора. Следует указать, что в конденсаторе также имеются активные потери энергии в диэлектрике. Однако величина этих потерь настолько мала, что ими можно пренебречь. На схеме замещения конденсатор можно представить в виде идеального емкостного элемента с параметром C , равным емкости конденсатора.

Последовательное соединение катушки и конденсатора изображено в виде схемы замещения на рисунке 3.4.

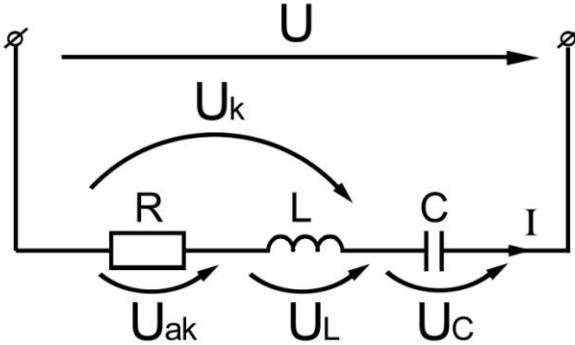


Рисунок 3.4. Схема замещения цепи с последовательным соединением катушки и конденсатора

При подключении такой цепи под напряжение U в ней возникает ток I . Вектор активной составляющей напряжений на катушке $\dot{U}_{ак}$ будет совпадать по направлению с вектором тока \dot{I} , так как соответствующие синусоиды мгновенных значений совпадают по фазе:

$$i = I_m \sin \omega t \text{ и } U = i \cdot r = I_m \cdot R \cdot \sin \omega t. \quad (3.1)$$

Вектор индуктивного напряжения $\dot{U}_L = \dot{I} \cdot X_L$ опережает по фазе вектор тока \dot{I} на 90° (рисунок 3.5), так как синусоида напряжения U_L на индуктивности опережает по фазе синусоиду тока i на 90° .

$$U_L = L \frac{di}{dt} = I_m \cdot \omega \cdot t \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (3.2)$$

Вектор емкостного напряжения $\dot{U}_C = \dot{I} \cdot X_C$ отстает по фазе от вектора тока \dot{I} на 90° (рисунок 3.6), так как синусоида напряжения на емкости при нулевых начальных условиях отстает от синусоиды тока i на 90° .

$$U_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{I_m}{\omega \cdot C} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (3.3)$$



Рисунок 3.5. Векторная диаграмма напряжения и тока при индуктивной нагрузке цепи

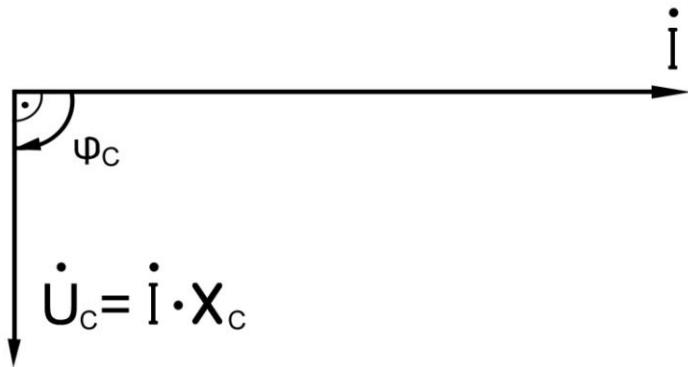


Рисунок 3.6. Векторная диаграмма напряжения и тока при емкостной нагрузке цепи

Для рассматриваемой цепи уравнений по второму закону Кирхгофа имеет следующий вид:

$$\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_L + \dot{U}_C, \quad (3.4)$$

где $\dot{U}_a = \dot{i} \cdot R$; $\dot{U}_L = \dot{i} \cdot X_L$; $\dot{U}_C = \dot{i} \cdot X_C$.

Согласно уравнению (3.4) и рисунков 3.5 и 3.6, векторная диаграмма напряжений цепи (рисунок 3.4) будет иметь вид, показанный на рисунке 3.7, где вектор $\dot{U}_{ак}$ совпадает по фазе с вектором \dot{I} , а вектор \dot{U}_L опережает по фазе на 90° вектор тока \dot{I} . Сумма векторов \dot{U}_L и $\dot{U}_{ак}$ дает вектор напряжения катушки:

$$\dot{U}_к = \dot{U}_{ак} + \dot{U}_L,$$

опережающий по фазе ток на угол φ_k .

На диаграмме (рисунок 3.7) напряжения \dot{U}_k и \dot{U} :

$$\dot{U}_k = \dot{I} \cdot z_k;$$

$$\dot{U} = \dot{I} \cdot z.$$

Вектор \dot{U}_C отстает по фазе на 90° от вектора тока \dot{I} . Сумма векторов \dot{U}_L , \dot{U}_{ak} и \dot{U}_C дает вектор напряжения сети \dot{U} , опережающий ток по фазе на угол φ .

Разделив и умножив стороны получившегося треугольника (рисунок 3.7) на величину тока \dot{I} , можно получить подобные треугольники сопротивлений и мощностей соответственно.

Полное сопротивление последовательной цепи z и коэффициент мощности $\cos\varphi$ можно определить следующим образом:

$$z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.5)$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{z} \quad (3.6)$$

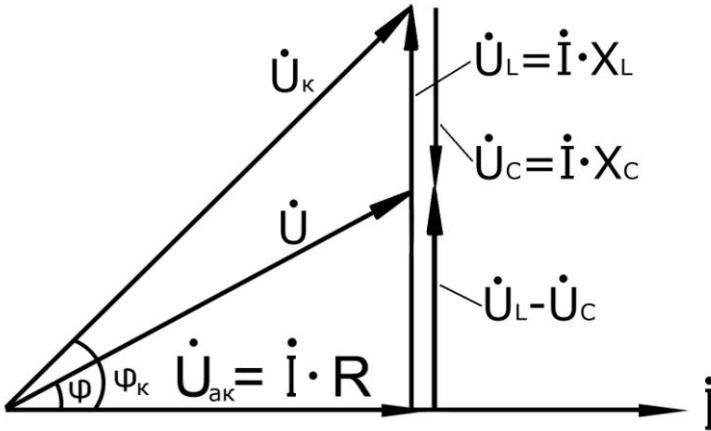


Рисунок 3.7. Векторная диаграмма тока и напряжений с последовательным соединением R , L и C элементов при $X_L > X_C$

Из векторной диаграммы напряжений (рисунок 3.7) получим формулу тока I , которая является выражением закон Ома для последовательной цепи переменного тока:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{z} \quad (3.7)$$

Соотношение между полной S , активной P и реактивными Q_L и Q_C

мощностями:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_L - Q_C} \quad (3.8)$$

Изменяя величину емкости в цепи, можно изменять соотношение между емкостными и индуктивными сопротивлениями и напряжениями:

$$U_C = I \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \quad \text{и} \quad U_L = I \cdot \omega \cdot L$$

и получать различные значения угла сдвига φ между вектором тока \dot{I} и вектора напряжения сети \dot{U} согласно уравнению (3.6). Если величина $\omega \cdot L > \frac{1}{\omega \cdot C}$, то и $U_L > U_C$, т.е. в цепи преобладает индуктивное сопротивление X_L и напряжение \dot{U}_L , поэтому вектор тока \dot{I} отстает по фазе от вектора напряжения сети \dot{U} на угол φ (см. рисунок 3.7).

Если $\omega \cdot L < \frac{1}{\omega \cdot C}$, наоборот, преобладает емкостное сопротивление X_C и напряжение \dot{U}_C , поэтому вектор тока \dot{I} опережает по фазе вектор напряжения сети (рисунок 3.8).

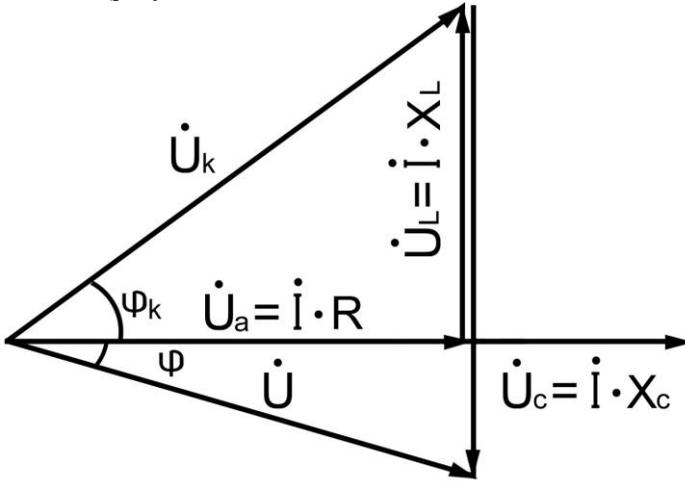


Рисунок 3.8. Векторная диаграмма тока и напряжений с последовательным соединением R , L и C элементов при $X_L < X_C$

При резонансе напряжений индуктивное сопротивление будет равно емкостному:

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (3.9)$$

а, следовательно, будут равны между собою индуктивное и емкостное напряжения (рисунок 3.9).

$$I \cdot X_L = I \cdot X_C; \quad U_L = U_C, \quad (3.10)$$

т.е. полная взаимная компенсация индуктивного и емкостного напряжений:

$$\dot{U}_L + \dot{U}_C = 0.$$

При резонансе напряжений угол сдвига $\varphi = 0$, следовательно:

$$\cos \varphi = 1 \quad (3.11)$$

Вектор вектора напряжение сети \dot{U} будет равен вектору активной составляющей напряжения на катушке $\dot{U}_{ак} : \dot{U} = \dot{U}_{ак}$ (рисунок 3.9).

Полное сопротивление цепи при резонансе $z_{рез}$ принимает минимальное значение $z_{рез} = R$, так как $X_L - X_C = 0$, а, следовательно, ток при резонансе $I_{рез}$ и активная мощность принимают максимальные значения:

$$I_{рез} = \frac{U}{z} = \frac{U}{R},$$

$$P = I_{рез}^2 \cdot R = U \cdot I_{рез} \quad (3.12)$$

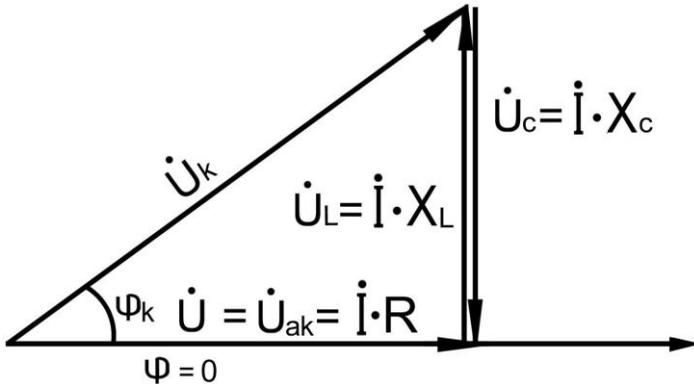


Рисунок 3.9. Векторная диаграмма тока и напряжений при резонансе напряжений ($X_L = X_C$)

Реактивная мощность при резонансе равна нулю:

$$Q = I \cdot (U_L - U_C) = 0; \quad Q_L - Q_C = 0. \quad (3.14)$$

Индуктивное U_L и емкостное U_C напряжения в $\frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}$ раз больше напряжения сети U :

$$U_L = U_C = I \cdot X_L = \frac{U}{R} \cdot X_L = \frac{U}{R} \cdot X_C.$$

Поэтому резонанс напряжений может оказаться опасным для установки. При испытании таких цепей требуется особая осторожность. Явление резонанса напряжений, т.е. взаимной компенсации реактивных

напряжений ($U_L - U_C = 0$), а последовательно, и реактивных мощностей ($Q_L - Q_C = 0$) объясняется тем, что мгновенные значения напряжений на индуктивности U_L и на емкости U_C в любой момент времени равны и имеют противоположные знаки. Отсюда следует, что если, например, индуктивность берет энергию из сети для создания магнитного поля, то в этот момент конденсатор, разряжаясь, отдает энергию в сеть.

Происходит взаимная компенсация энергии, потребляемой ими из сети.

Таким образом, при резонансе полная энергия, потребляемая из сети, расходуется только на нагревание резисторного элемента цепи.

Кривая зависимости z сопротивления цепи от величины емкости C показана на рисунке 3.10. При $C_{рез} = \frac{1}{\omega^2 \cdot L}$ величина z минимальна и равна $z_{рез} = R$.

На рисунке 3.10 показаны также кривые зависимости тока I и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от величины емкости C . При $C = C_{рез}$ ток I имеет максимальное значение $I_{рез} = \frac{U}{R}$, при всех других значениях емкости

$$I = \frac{U}{z}.$$

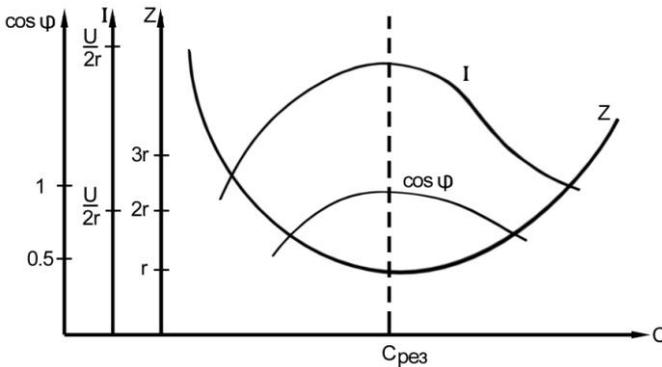


Рисунок 3.10. Графики зависимости полного сопротивления цепи z , тока I и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от емкости (при $L = \text{const}$)

Из выражения (3.9) видно, что резонанс напряжений в цепи может быть получен изменением индуктивности L или емкости C при неизменной частоте сети f или изменением частоты сети при заданных постоянных L и C .

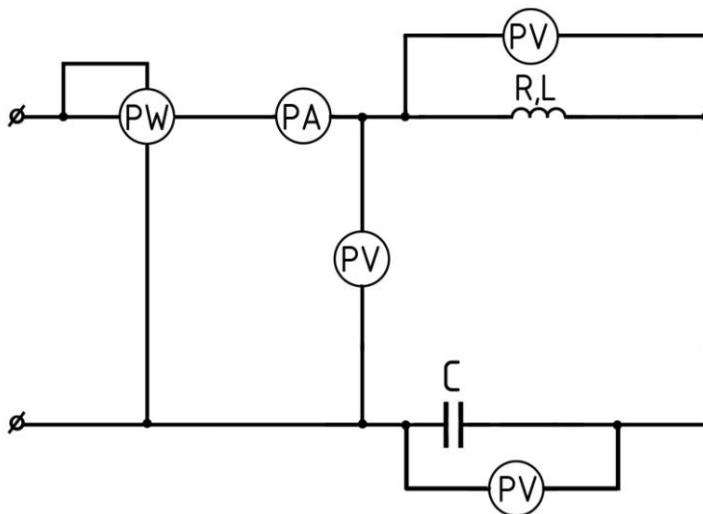


Рисунок 3.11. Схема соединений электрической цепи с последовательным включением катушки индуктивности и батареи конденсаторов

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 3.11.
2. Произвести исследование явления резонанса напряжений по следующей методике. Изменяя величину емкости включением тумблеров, установить емкость C_0 , при которой ток в цепи I и активная мощность P имеют максимальные значения (явление близкое к резонансу напряжений). Произвести измерения напряжения U в цепи, напряжения на катушке U_k , напряжения на конденсаторе U_C , тока I в цепи, мощности P или активного сопротивления катушки индуктивности R . Результаты измерений при опыте близком к резонансу напряжений записать в строку №4 таблицы 3.1. Изменяя затем емкость ступенями на 10 мкФ, произвести измерения для 3 точек при емкостях, меньших C_0 , и для 3 точек при емкостях, больших C_0 .
3. Результаты измерений для каждой установленной величины емкости занести в таблицу 3.1. Значения устанавливаемых емкостей записать в столбец таблицы C_{np} , мкФ.
4. По данным опытов вычислить величины, указанные в таблице 3.1 (полное сопротивление цепи z , активное сопротивление R , реактивное сопротивление X , коэффициент мощности цепи $\cos\varphi$, емкостное сопротивление X_C , емкость C , полное сопротивление катушки z_k , индуктивное

сопротивление катушки X_L , индуктивность катушки L , коэффициент мощности для катушки $\cos\varphi_K$.

Таблица 3.1

Результаты исследования цепи при последовательном соединении катушки и конденсатора и резонанса напряжений

№ п/п	Измерено						Вычислено									
	$C_{\text{фр}}, \text{мкФ}$	$U, \text{В}$	$U_K, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$I, \text{А}$	$R, \text{Ом}$	$Z, \text{Ом}$	$P, \text{Вт}$	$X, \text{Ом}$	$\cos\varphi$	$X_C, \text{Ом}$	$C, \text{мкФ}$	$Z_K, \text{Ом}$	$X_L, \text{Ом}$	$L, \text{мГн}$	$\cos\varphi_K$
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																

Формулы для вычислений

$$Z = \frac{U}{I}; \quad R = \frac{P}{I^2} \text{ или } P = I^2 \cdot R; \quad X = \sqrt{z^2 - R^2};$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{R}{z}; \quad X_C = \frac{U_C}{I}; \quad C = \frac{1}{\omega \cdot X_C};$$

$$z_K = \frac{U_K}{I}; \quad X_L = \sqrt{z_K^2 - R^2};$$

$$L = \frac{X_L}{\omega}; \quad \cos\varphi_K = \frac{R}{z_K}.$$

5. По данным таблицы 3.1 построить кривые $I = f_1(C)$, $\cos\varphi = f_2(C)$; $z = f_3(C)$.

6. Построить векторные диаграммы тока и напряжений для трех отсчетов: при $X_L > X_C$ (7 строка), при максимальном значении тока в цепи, когда $X_L \approx X_C$ (4 строка), при $X_L < X_C$ (1 строка).

Контрольные вопросы

1. Что называется индуктивным и емкостным сопротивлением и от чего они зависят?
2. Как вычисляется полное сопротивление неразветвленной цепи переменного тока?
3. Как вычисляется действующее значение тока в цепи с последовательным соединением резистивного, индуктивного и емкостного элементов?
4. Что такое коэффициент мощности цепи переменного тока и почему нужно стремиться к его повышению при потреблении электрической энергии?
5. При каком условии возникает резонанс напряжений в цепи переменного синусоидального тока? Чем характеризуется это явление?
6. Объясните, какую опасность может представлять резонанс напряжений в электрических цепях?
7. Каким должно быть соотношение индуктивного и емкостного сопротивлений, чтобы ток в цепи опережал напряжение? Поясните это при помощи векторной диаграммы.
8. Что нужно дополнительно включить в эту цепь, чтобы получить в ней резонанс напряжений?
9. Как определить резонансную частоту?
10. В цепи переменного тока частотой $f=50$ Гц с последовательно включенными катушкой и конденсатором имеет место резонанс. Определить напряжение на катушке и конденсаторе, если $U = 20$ В, $R = 10$ Ом, $C = 1$ мкФ. Вычислить индуктивность катушки.

Лабораторная работа № 4

Цепь переменного синусоидального тока с параллельным соединением индуктивности и емкости. Резонанс токов

Цель работы: рассмотреть явления, происходящие в цепи переменного тока, содержащей параллельно соединенные катушку и конденсатор (рисунок 4.1), ознакомиться с резонансом токов.

Основные понятия и определения

Резонанс токов – это явление, возникающее в цепи переменного синусоидального тока при параллельном соединении индуктивных и емкостных элементов, в случае, когда полная реактивная проводимость цепи равна нулю.

Рассмотрим процессы в цепи с параллельным соединением катушки и конденсатора (рисунок 4.1).

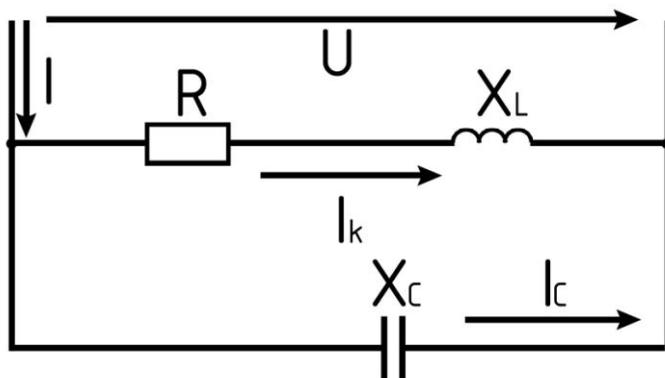


Рисунок 4.1. Схема электрической цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и емкости

Когда к цепи с параллельным соединением конденсатора и катушки индуктивности подается переменное синусоидальное напряжение U , од-но и то же напряжение приложено к обоим элементам цепи.

Общий ток цепи I разветвляется на ток в конденсаторе I_C (емкостная составляющая общего тока) и ток в катушке I_L (индуктивная составляющая общего тока), причем ток I_L отстает от напряжения U на 90° , а I_C опережает на 90° .

Токи \dot{I}_C и \dot{I}_L имеют противо- положные фазы (180°) и в зависимости от их величин уравнивают друг друга полностью или частично. Они могут быть представлены с помощью векторных диаграмм токов (рисунок 4.2).

Когда токи I_C и I_L равны по величине ($I_C = I_L$), то общий ток цепи равен нулю, имеет место резонанс токов (векторная диаграмма рисунок 4.2, а).

Когда $I_C > I_L$, т.е. преобладает ток конденсатора, то общий ток цепи \dot{I} является по характеру емкостным и опережает напряжение \dot{U} на 90° (рисунок 4.2, б).

Когда $I_C < I_L$, т.е. преобладает ток катушки, общий ток цепи \dot{I} является индуктивным и отстает от напряжения \dot{U} на 90° (рисунок 4.2, в).

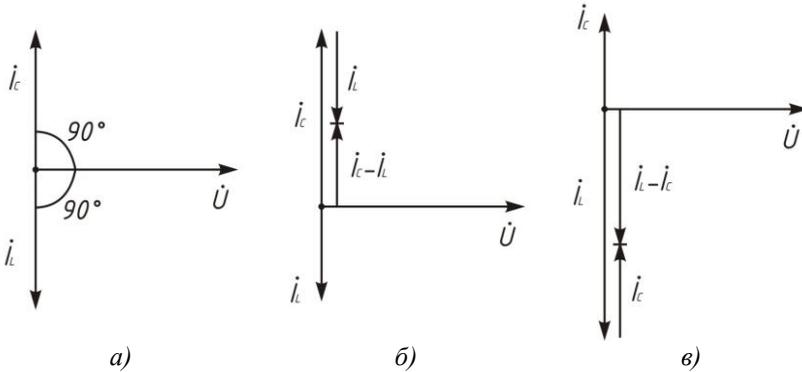


Рисунок 4.2. Векторные диаграммы напряжения и токов в цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и емкости

Эти рассуждения проведены в пренебрежении потерями активной мощности в конденсаторе и катушке.

При резонансе токов реактивная проводимость цепи:

$$B = B_L - B_C$$

равна нулю. Резонансная частота определяется из уравнения:

$$\frac{1}{\omega_0 \cdot L} - \omega_0 C = 0,$$

откуда, так же, как и при резонансе напряжений:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad \text{и} \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}.$$

Полная проводимость при резонансе токов оказывается близкой к нулю. Остается нескомпенсированной лишь небольшая активная проводимость, обусловленная активным сопротивлением катушки и несовершенной изоляцией конденсатора. Поэтому ток в неразветвленной части

цепи имеет минимальное значение, тогда как токи I_L и I_C могут превышать его в десятки раз.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 4.3.

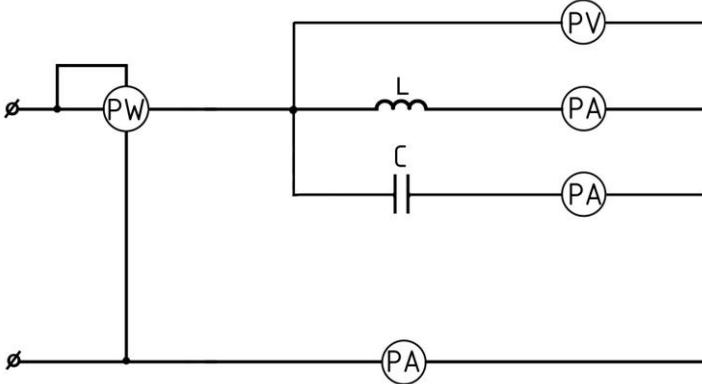


Рисунок 4.3. Схема соединений электрической цепи с параллельным включением катушки индуктивности и батареи конденсаторов

2. Изменяя емкость (включением с помощью тумблеров различных комбинаций конденсаторов), установить в цепи режим резонанса токов. Резонанс наступает при минимальном значении общего тока $I = I_{\min}$. Емкость C_0 , соответствующая резонансу, называется резонансной. Произвести измерение напряжения U , общего тока I , тока в ветви с индуктивностью I_L , тока в ветви с емкостью I_C , мощности P или активного сопротивления R . Данные измерений при резонансе занести в таблицу, в строку №4. Изменяя затем емкость на 10 мкФ, произвести измерения для 3-х точек при емкостях меньших резонансной C_0 и для 3-х точек при емкостях больших резонансной емкости.

3. Полученные данные свести в таблицу 4.1. Значения устанавливаемых емкостей записать в столбец таблицы C_{np} , мкФ.

4. По данным опыта определить параметры всей цепи (полное сопротивление z , коэффициент мощности цепи $\cos\varphi$, активную мощность P , полное сопротивление катушки z_k , коэффициент мощности катушки $\cos\varphi_k$, реактивный ток I_L , емкостное сопротивление X_C и емкость C).

Таблица 4.1

Результаты исследования цепи при параллельном соединении катушки и конденсатора и резонанса токов

№ п/п	Измерено						Вычислено								
	$C_{\text{ср}}, \text{мкФ}$	$U, \text{В}$	$I_K, \text{В}$	$I_C, \text{В}$	$I, \text{А}$	$R, \text{Ом}$	$Z, \text{Ом}$	$P, \text{Вт}$	$X_C, \text{Ом}$	$C, \text{мкФ}$	$Z_K, \text{Ом}$	$\cos\varphi$	$X_L, \text{Ом}$	$I_L, \text{А}$	$\cos\varphi_K$
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															

Формулы для вычислений

$$Z = \frac{U}{I}; \quad R = \frac{P}{I_K^2} \quad \text{или} \quad P = I_K^2 \cdot R; \quad \cos\varphi = \frac{P}{U \cdot I};$$

$$X_C = \frac{U}{I_C}; \quad C = \frac{1}{\omega \cdot X_C};$$

$$z_K = \frac{U}{I_K}; \quad X_L = \sqrt{z_K^2 - R^2};$$

$$I_L = I_K \cdot \sin\varphi_K; \quad \cos\varphi_K = \frac{P}{U \cdot I_K}.$$

5. По данным опыта и вычислений (таблицы 4.1) построить кривые $I = f_1(C)$, $\cos\varphi = f_2(C)$; $z = f_3(C)$ (рисунок 4.4).

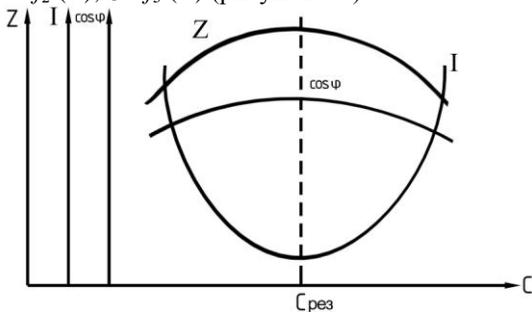


Рисунок 4.4. Графики зависимости полного сопротивления цепи z , тока I и коэффициента мощности $\cos\varphi$ от емкости (при $L = \text{const}$)

6. Построить векторные диаграммы токов для трех отсчетов: при $B_L > B_C$, при резонансе, когда $B_L \approx B_C$ (4 строка), при $B_L < B_C$.

Контрольные вопросы

1. Как и почему изменяется ток в цепи, содержащей индуктивную катушку, если параллельно катушки включить конденсатор?
2. Каким должно быть соотношение реактивных проводимостей катушки и конденсатора, чтобы ток в общей цепи опережал напряжение?
3. Каково условие резонанса токов?
4. Способ повышения коэффициента мощности с помощью конденсаторных батарей и его экономическое значение.
5. Почему при резонансе токов ток в общей цепи имеет наименьшее значение?
6. Начертить векторную диаграмму, соответствующую условию $V_L < V_C$.
7. Записать выражение для полного комплексного сопротивления цепи, представленной на рисунке 4.1, если известны значения R , L и C при частоте $f = 50$ Гц.

Лабораторная работа № 5

Исследование трехфазных электрических цепей переменного синусоидально тока при симметричной и несимметричной нагрузках фаз. Соединение звездой и треугольником

Цель работы: Экспериментальная проверка соотношений между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении звездой и треугольником. Изучение особенностей режимов работы трехфазных цепей при соединении приемников звездой и треугольником. Исследование влияния различных видов нагрузки на параметры трехфазных электрических цепей. Изучение способов измерения и расчета мощности в трехфазных цепях.

Основные понятия и определения

Трехфазные цепи в современной электроэнергетике получили наибольшее распространение благодаря их преимуществам в отношении экономичного передачи электрической энергии, а также возможностей получения кругового вращающегося магнитного поля и двух эксплуатационных напряжений в одной установке – фазного и линейного.

Основными способами соединений фаз обмоток генераторов, трансформаторов, электродвигателей и других приемников являются соединения звездой и треугольником.

Соединение звездой.

При соединении фаз обмоток генераторов или приемников в звезду концы обмоток (x, y, z) или выводы групп электроприемников соединяют в одну общую точку, которая называется нейтральной точкой (рисунок 5.1). Провод, соединяющий нейтральные точки генератора O и приемника O' называется нейтральным или нулевым: остальные провода – линейными. Напряжение между линейным проводом каждой фазы генератора или приемника и нулевым проводом, а также токи в фазах, называют фазными: U_ϕ, I_ϕ . Токи в линейных проводах и напряжения между ними называют, соответственно, линейными: U_λ, I_λ .

Нагрузка называется симметричной, если сопротивление всех фаз одинаковы по величине и характеру: $z_a = z_b = z_c$ и $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$.

Если это условие не выполняется, то нагрузка будет несимметричной, при этом она может быть равномерной, если одинаковы величины (модули) сопротивления фаз, т.е. $z_a = z_b = z_c$.

При соединении звездой по фазе течет тот же ток, что и в линейном проводе. Поэтому $I_\phi = I_\lambda$. Линейные напряжения являются векторной разностью соответствующих фазных напряжений:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (5.1)$$

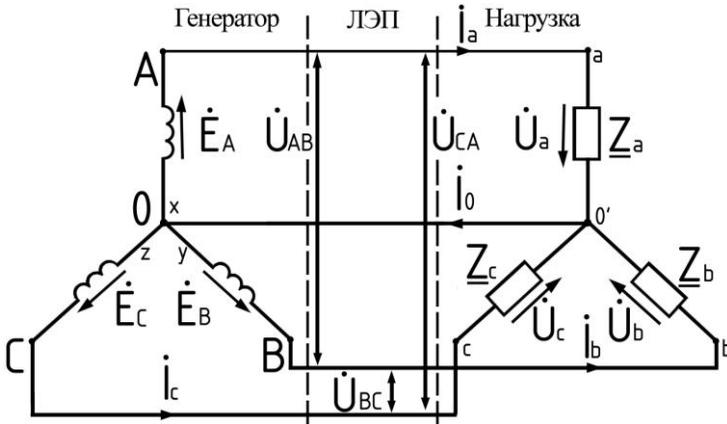


Рисунок 5.1. Схема соединения звездой

В основу векторной диаграммы для рассматриваемого соединения взяты три вектора фазных напряжений \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C , углы между которыми равны 120° .

По отношению к каждому из этих направлений вектор соответствующего фазного тока сдвинут на угол φ , величина которого зависит от характера нагрузки и определяется по формуле: $\varphi = \arctg \frac{X_\phi}{R_\phi}$, где R_ϕ и

X_ϕ — соответственно активное и реактивное сопротивления фазы нагрузки.

Векторы линейных напряжений строятся по уравнениям (5.1).

При симметричной нагрузке токи в фазах будут одинаковыми, а длина каждого из векторов линейного напряжения будет в $\sqrt{3}$ раз больше длины вектора фазного напряжения.

При несимметричной нагрузке и наличии нейтрального провода напряжения на каждой фазе приемника U_a , U_b , U_c при изменениях нагрузки практически остаются неизменными и равными соответствующим фазным напряжениям генератора U_A , U_B , U_C . Это связано с тем, что сопротивление нейтрального провода обычно значительно меньше сопротивления фаз приемника. Следовательно, нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке. Поэтому режимы работы каждой фазы нагрузки, находящейся под неизменным фазным напряжением генератора, не будут зависеть от режима работы других фаз. Если пренебречь падением напряжений в

нейтральном и линейных проводах, то расчет токов в фазах нагрузки и в нулевом проводе осуществляется на основе следующих соотношений:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C}; \quad (5.2)$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (5.3)$$

Если сопротивлением нейтрального провода не пренебрегать, то при $\dot{I}_0 \neq 0$ напряжения на фазах нагрузки не будут равны соответствующим напряжениям генератора. В этом случае рассчитывается напряжение между нейтральными точками генератора и приемника:

$$\dot{U}_{00'} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_0}, \quad (5.4)$$

где $\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}$, $\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}$, $\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}$, $\underline{Y}_0 = \frac{1}{\underline{Z}_0}$ – комплексные проводимости фаз нагрузки и нейтрального провода.

Напряжения на фазах нагрузки определяется по следующим соотношениям:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{00'}, \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{00'}, \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{00'}.$$

При симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе отсутствует:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

и отпадает необходимость иметь этот провод.

Если приемники соединены звездой без нулевого провода, то изменение величины тока в одной из фаз оказывает существенное влияние на работу других фаз. При несимметричной нагрузке и отсутствии нейтрального провода расчет трехфазной цепи осуществляется аналогично. При этом в выражении (5.4) следует положить $\underline{Y}_0 = 0$.

Соединение треугольником.

Фазные обмотки генератора или приемника соединяются в треугольники так (рисунок 5.2), чтобы конец первой фазной обмотки x соединялся с началом B второй фазной обмотки, а конец y второй обмотки с началом третьей обмотки C и конец z её с началом A первой обмотки.

Из схемы рисунок 5.2 видно, что независимо от характера нагрузки напряжение в каждой фазе приемника равно линейному $U_\phi = U_l$. Если напряжения и сопротивления фаз нагрузки заданы, то фазные токи определяются по формулам:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}; \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}.$$

Линейные токи определяются по фазным токам из уравнений, составленным по первому закону Кирхгофа для узлов A, B, C :

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \quad (5.5)$$

Независимо от характера нагрузки $\dot{I}_A = \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$.

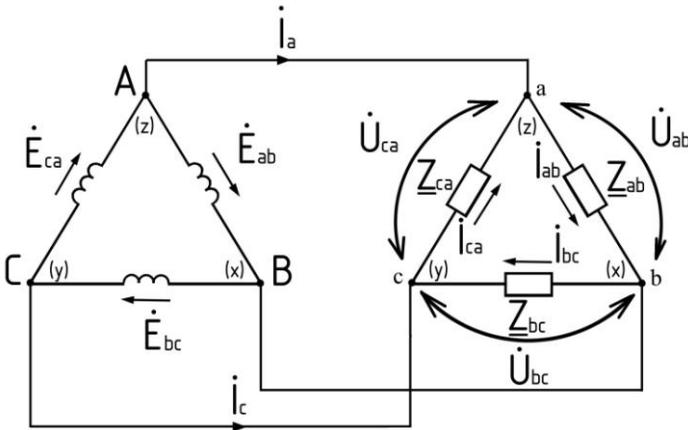


Рисунок 5.1. Схема соединения треугольником

При построении векторной диаграммы в качестве исходных берутся три вектора линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , которые являются вместе с тем и фазными напряжениями. Углы между ними равны 120° . Затем откладываются векторы фазных токов I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} . Векторы линейных токов I_A , I_B , I_C , строятся по уравнениям (5.5). Если нагрузка симметрична, то соотношение между линейными и фазными токами аналогично соотношению между линейными и фазными напряжениями при соединении звездой: $I_L = \sqrt{3}I_\phi$. Для рассматриваемого соединения при изменении сопротивления одной из фаз будут изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах соединенных с этой фазой. Режим работы других фаз останется неизменным, так как линейные напряжения генератора постоянны. Поэтому схема соединения в треугольник широко используется для включения несимметричной нагрузки, в частности, в осветительных установках.

Определение мощности в трехфазных цепях.

В симметричной трехфазной цепи, потребляемые каждой фазой мощности P_ϕ , равны между собой, и в этом случае общая мощность $P = 3 \times P_\phi$, а для каждой из фаз справедливо общее выражение мощности в цепи переменного тока: $P_\phi = U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos\varphi$, где φ угол сдвига между фазными напряжением и током.

При соединении звездой $U_{\phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}}$, $I_{\phi} = I_{л}$, а при соединении треугольником $U_{\phi} = U_{л}$; $I_{\phi} = \frac{I_{л}}{\sqrt{3}}$. В обоих случаях, заменяя фазные величины через линейные, мы получим одно и то же выражение для мощности симметричной трехфазной цепи:

$$P = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л} \cdot \cos \varphi.$$

При симметричной нагрузке измеряют мощность только мощность одной фазы P_{ϕ} :

$$P = 3 \cdot P_{\phi}.$$

В случае несимметричной нагрузки определяется мощность каждой фазы, затем эти мощности суммируются, и определяется общая активная мощность все трехфазной системы:

$$P = P_{\phi 1} + P_{\phi 2} + P_{\phi 3}.$$

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему соединения звездой с нулевым проводом. В качестве нагрузок фаз используются блоки резисторов. Подобрать близкие по значению сопротивления. Убедиться, что ток в нулевом проводе равен нулю или близок к нулю. Произвести измерения токов и напряжений. Результаты измерений занести в первую строку таблицы 5.1.
2. Отключить нулевой провод и произвести измерения токов и напряжений для случая симметричной нагрузки без нулевого провода. Результаты измерений записать в первую строку таблицы 5.2.

Таблица 5.1

Результаты исследования трехфазной цепи с нулевым проводом

Характер нагрузки	Результаты измерений									Вычислено				
	$I_{\phi A}$	$I_{\phi B}$	$I_{\phi C}$	$U_{\phi A}$	$U_{\phi B}$	$U_{\phi C}$	$U_{\phi AB}$	$U_{\phi BC}$	$U_{\phi CA}$	$P_{\phi A}$	$P_{\phi B}$	$P_{\phi C}$	P_{ϕ}	$U_{л} / U_{\phi}$
Симметричная														
Несимметричная														

3. Изменить сопротивления резисторов в фазах по отношению друг

к другу или включить в третью фазу вместо резистора конденсатор с емкостью 10 мкФ. Теперь нагрузка будет несимметричной. Подключить обратно нулевой провод. Произвести замеры токов и напряжений при несимметричной нагрузке фаз с нулевым проводом. Убедиться в наличии тока в нулевом проводе. Результаты измерений записать во вторую строку таблицы 5.1.

4. Отключить нулевой провод при несимметричной нагрузке и произвести измерения токов и напряжений для случая несимметричной нагрузки фаз без нулевого провода. Убедиться в изменении фазных напряжений. Результаты измерений записать во вторую строку таблицы 5.2.

Таблица 5.2

Результаты исследования трехфазной цепи без нулевого провода

Характер нагрузки	Результаты измерений									Вычислено				
	$I_{\text{н, A}}$	$I_{\text{н, A}}$	$I_{\text{н, A}}$	$U_{\text{н, B}}$	$P_{\text{с, Вт}}$	$P_{\text{с, Вт}}$	$P_{\text{с, Вт}}$	$P_{\text{с, Вт}}$	$U_{\text{л}} / U_{\text{ф}}$					
Симметричная														
Несимметричная														

5. По данным таблиц 5.1 и 5.2 вычислить отношение линейных и фазных напряжений. Определить общую мощность цепи. Построить векторные диаграммы для случаев несимметричной нагрузки с нулевым проводом и без нулевого провода, предварительно выбрав оптимальный масштаб диаграммы.

6. Сопоставить величины фазных напряжений для случаев несимметричной нагрузки с нулевым проводом и без нулевого провода.

7. Сделать выводы по исследованию схемы соединения нагрузки звездой.

Соединение треугольником.

1. Собрать схему соединения треугольником, используя в качестве нагрузки те же резисторы, что и в схеме соединения звездой. Произвести измерения токов и напряжений для случаев симметричной и несимметричной нагрузки фаз. Результаты измерений записать в таблицу 5.3.

2. По данным таблицы 5.3 вычислить соотношение линейных и

фазных токов. Определить общую мощность цепи. Построить векторную диаграмму для случая несимметричной нагрузки фаз, предварительно выбрав оптимальный масштаб диаграммы.

Таблица 5.3

Результаты исследования трехфазной цепи при соединении треугольником

Характер нагрузки	Результаты измерений									Вычислено				
	$I_{A, A}$	$I_{B, A}$	$I_{C, A}$	$I_{A, B}$	$I_{B, B}$	$I_{C, B}$	$U_{A, B}$	$U_{B, C}$	$U_{C, A}$	P_{Σ}	P_{Σ}	P_{Σ}	P_{Σ}	I_{Σ} / I_{ϕ}
Симметричная														
Несимметричная														

3. Сделать выводы по исследованию схемы соединения нагрузки треугольником.

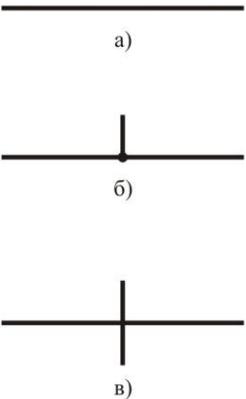
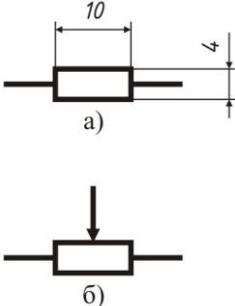
Контрольные вопросы

1. Почему наибольшее распространение в электроэнергетике получили трехфазные цепи?
2. Объясните способы соединения звездой и треугольником.
3. Какая нагрузка называется симметричной, равномерной и несимметричной?
4. Какие напряжения и соответственно токи называются линейными и фазными? Их соотношение при соединении звездой и треугольником.
5. Объясните построение векторных диаграмм при соединении звездой и треугольником.
6. В каком случае применяется соединение звездой с нулевым проводом и без него?
7. Что такое напряжение смещения нейтрали и как его определить?

Приложения

Приложение 1

Условные графические обозначения элементов на электрических схемах

Наименование	Обозначение буквенное по ГОСТ 2.710.81	Обозначение графическое	Стандарт
Линия электрической связи*		 <p>а) б) в)</p>	ГОСТ 2.751-73
Резистор а – постоянный; б – переменный	<i>R</i>	 <p>а) б)</p>	ГОСТ 2.728-74
Катушка индуктивности	<i>L</i>	 <p><i>R</i> 1,5...4</p>	ГОСТ 2.723-68
Конденсатор постоянной емкости	<i>C</i>	 <p>6 1,5</p>	ГОСТ 2.728-74
Прибор электроизмерительный**	<i>P</i>	 <p>$\varnothing 10$</p>	ГОСТ 2.729-68

* Линия электрической связи обозначается тонкой линией (а), её соединения с точкой (б), пересечения без точки (в). Толщина линий при выполнении схем выбирается 0,18 – 0,4 в зависимости от выбранного формата чертежа.

** Для указания назначения прибора в его графическое обозначение вписывают буквенное обозначение единиц измерения или измеряемых величин.

Например: PA – амперметр, PV – вольтметр, PW – ваттметр.

Библиографический список

1. Касаткин А.С. Немцов М.В. Электротехника, - М: Высшая школа, - 2000.
2. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию, - М: Высшая школа, 2000.
3. Иванов И. И., Соловьев Г. И., Равдоник В. С. Электротехника: учебник, - СПб.: издательство «Лань», - 2003.
4. Иванов И. И., Равдоник В. С. Электротехника: учебное пособие для не электротехнических спец. Вузов, - СПб.: издательство «Лань», - 2005.
5. Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники, - М.: Высшая школа, - 2004.
6. Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники, - М: Высшая школа, 2000.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники, - М: Высшая школа, 1999.
8. Электротехника и основы электроники. / Под ред. О.П. Глудкина и Б.П. Соколова. – М.: Высшая школа. 1993.
9. Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа., 2000 г.
10. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1999 г., 638 с.
11. Нейман Л.Р., Демирчян К.С., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л. Теоретические основы электротехники. Т.1- СПб.: Питер, 2006. – 463 с.

Содержание

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1. Поверка амперметра и вольтметра.	9
Лабораторная работа № 2. Проверка основных законов электрических цепей.....	14
Лабораторная работа № 3. Цепь переменного синусоидального тока с последовательным соединением катушки и конденсатора. Резонанс напряжений	23
Лабораторная работа № 4. Цепь переменного синусоидального тока с параллельным соединением индуктивности и емкости. Резонанс токов	34
Лабораторная работа № 5 Исследование трехфазных электрических цепей переменного синусоидально тока при симметричной и несимметричной нагрузках фаз. Соединение звездой и треугольником.....	39
Приложения.....	47
Приложение 1. Условные графические обозначения элементов на электрических схемах.....	47
Библиографический список.....	49

Учебное издание

Общая электротехника и электроника

Методические указания
к лабораторным работам
для студентов электрических и неэлектрических специальностей

Составитель Прасол Дмитрий Александрович
Михайлова Марина Юрьевна

Подписано в печать 29.05.09. Формат 60 x 84/16. Усл. печ. л. 4,4. Уч.-изд. л. 4,8.

Тираж 250 экз. Заказ Цена

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете

им. В.Г. Шухова

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46