

Министерство сельского хозяйства
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный государственный
аграрный университет»

Л. Н. Горбунова

***ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ***
Часть 1

Лабораторный практикум

Благовещенск

Дальневосточный ГАУ

2023

УДК 621.3
ББК 31.2
Г67

Рецензент

*Ольга Валерьевна Скрипко, доктор технических наук,
профессор, заведующая кафедрой автоматизации
производственных процессов и электротехники
Амурского государственного университета*

*Рекомендовано к использованию в учебном процессе
методическим советом электроэнергетического факультета
Дальневосточного государственного аграрного университета*

Горбунова, Л. Н. Теоретические основы электротехники. Часть 1 :
Г67 лабораторный практикум / Л. Н. Горбунова ; Дальневост. гос. аграр. ун-т. – Благовещенск : Дальневосточный ГАУ, 2023. – 133 [1] с.

ISBN 978-5-9642-0580-7

Лабораторный практикум разработан в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования, образовательными программами и рабочей программой дисциплины «Теоретические основы электротехники». Он содержит перечень лабораторных работ с методикой их выполнения и практическими заданиями. Включены тестовые задания по темам дисциплины. Лабораторный практикум предназначен для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и 35.03.06 «Агроинженерия».

УДК 621.3
ББК 31.2

ISBN 978-5-9642-0580-7 © Горбунова Л. Н., 2023
© ФГБОУ ВО Дальневосточный
государственный аграрный университет, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Техника безопасности при выполнении работ электротехнической лаборатории	6
Правила сборки электрических схем	11
Общие требования к организации практикума и структуре отчета по лабораторной работе	14
Лабораторная работа 1.....	16
Электроизмерительные приборы.....	16
Тестовые задания.....	29
Лабораторная работа 2.....	32
Исследование линейной электрической цепи постоянного тока с последовательным и параллельным соединением приемников электрической энергии.....	32
Лабораторная работа 3.....	42
Исследование законов Кирхгофа в разветвленной электрической цепи постоянного тока. Построение потенциальной диаграммы	42
Тестовые задания по электрическим цепям постоянного тока	52
Лабораторная работа 4.....	55
Исследование неразветвленной электрической цепи переменного тока. Резонанс напряжений.....	55
Лабораторная работа 5.....	70
Исследование разветвленной электрической цепи переменного тока. Резонанс токов	70
Тестовые задания по электрическим цепям однофазного переменного тока.	82
Лабораторная работа 6.....	85
Исследование электрических цепей со взаимной индуктивностью	85
Тестовые задания по электрическим цепям со взаимной индуктивностью ...	93

Лабораторная работа 7.....	96
Исследование электрического состояния трехфазной цепи с однофазными приемниками, соединенными звездой	96
Лабораторная работа 8.....	105
Исследование электрического состояния трехфазной цепи с однофазными приемниками, соединенными треугольником.....	105
Лабораторная работа 9.....	112
Исследование трехфазной цепи при аварийных режимах.	
Метод симметричных составляющих	112
Тестовые задания по трехфазным цепям переменного тока	125
Список рекомендуемой литературы.....	128
Приложение А.....	129
Условные изображения часто применяемых элементов электрической цепи	129
Приложение Б	130
Условные обозначения на шкалах приборов.....	130

ВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум составлен в соответствии с программой дисциплины «Теоретические основы электротехники» для обучающихся очной и заочной форм обучения по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и очной формы обучения направления 35.03.06 «Агроинженерия». Он способствует формированию у бакалавров умений и навыков, направленных на изучение основных вопросов по линейным электрическим цепям.

Представленный материал содержит общие теоретические сведения, методические указания к выполнению лабораторных работ по теме «Линейные электрические цепи постоянного и переменного тока», а также перечень необходимой литературы ко всем разделам темы. После каждой лабораторной работы приведены контрольные вопросы, которые позволят закрепить изученный материал. К каждому разделу содержится тестовый материал для проверки знаний.

В практикуме изложены теоретические сведения, понятия и величины постоянного, переменного однофазного и трехфазного электрического тока. Рассмотрены основные элементы (источники, потребители, электроизмерительные приборы), используемые в электрической цепи постоянного и переменного тока. Приведены методики расчета электрических цепей.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Лаборатория электротехники относится к помещениям повышенной опасности, так как в ней присутствуют электротехническая аппаратура и электрические машины, питаемые от источников электрической энергии.

Основное рабочее напряжение, с которым имеют дело учащиеся, составляет 50 В. Оно является безопасным для человека, поскольку при минимальном сопротивлении тела человека 800 Ом максимально возможный ток при таком напряжении не превышает предельно опасной величины 50 мА. Однако напряжение 220 В, которое используется для работы электронных измерительных приборов, является опасным для человека.

Поэтому работа в лаборатории требует от учащихся соблюдения **правил поведения и техники безопасности**:

1) работать разрешается строго за своим рабочим местом, перемещения в лаборатории должны быть максимально ограничены;

2) прежде чем приступить к соединению элементов схемы, расположенных на стенде, необходимо убедиться, что контакты автоматов сети отключены;

3) сборка электрических схем должна производиться соединительными проводами с исправной изоляцией; нельзя пользоваться проводами без наконечников или штырей;

4) ни в коем случае не следует касаться руками незаизолированных соединительных проводов и контактов в цепи, находящейся под напряжением;

5) нельзя проверять пальцами наличие напряжения между выводами источника питания или линейных проводов сети;

6) любое изменение в схеме (пересоединение проводников) должно выполняться при обесточенной электрической цепи;

7) все переключения и изменения должны быть проверены преподавателем;

8) нельзя касаться руками клемм, открытых токоведущих частей и находящихся под напряжением элементов цепей;

9) нельзя прикасаться к зажимам отключенных конденсаторов; помните, что в них может сохраняться опасный остаточный заряд;

10) опасность представляет также электрическая цепь, содержащая индуктивные катушки с большим числом витков; при их размыкании на концах катушки может индуцироваться значительная ЭДС;

11) нельзя самостоятельно исправлять вышедшее из строя электрооборудование;

12) во время выполнения лабораторной работы категорически запрещается хождение по лаборатории;

13) прежде чем разбирать цепь, убедитесь, что контакты автоматов сети разомкнуты, источники питания отключены;

14) перед проведением лабораторных работ студенты обязаны ознакомиться с действующими в учебном заведении инструкциями по охране труда при эксплуатации электроустановок до 1 000 В, пожарной безопасности, охране труда при проведении работ в лаборатории и расписаться в соответствующем журнале.

Первая медицинская помощь при поражении электрическим током. Электрическая травма считается одним из самых опасных повреждений для человека, и получить ее можно в самых неожиданных местах.

Источником опасности для человека могут стать оголенные электрические провода, неисправные электроприборы. Поражение может наступить на производстве или при воздействии сильного разряда молнии.

Первая помощь при ударе током должна быть оказана незамедлительно, главное сделать ее грамотно и при этом не навредить себе.

Опасность воздействия электрического тока заключается в его негативном влиянии на работу внутренних органов. Ток вызывает нагрев тканей и беспорядочное сокращение всех групп мышц. В местах входа электрической дуги на коже человека определяются места входа и выхода, они могут быть незначительными снаружи, а в глубоких подкожных слоях вызывать сильнейшие поражения вплоть до некроза тканей. Отмечается негативное влияние электрического тока на сердце; в нем появляются неритмичные сокращения, в тяжелых случаях приводящие к полной остановке сердечной деятельности.

Даже кратковременное воздействие тока может вызвать остановку дыхания, потерю сознания и прекращение сердечной деятельности, поэтому первая помощь при ударе электрическим током должна быть оказана на месте.

В первый момент необходимо полностью адекватно оценить обстановку. Если человек еще находится под электрическим током, то нужно выполнить следующие действия: 1) отключить электричество в щитке; убрать провода подалеже от пострадавшего деревянной палкой; 2) не прикасаться к оголенной коже пострадавшего голыми руками, по возможности нужно надеть перчатки или обмотать руки сухой тряпкой. В крайнем случае, нужно вытянуть человека из зоны поражения за край одежды на несколько метров.

Далее необходимо немедленно уложить пострадавшего на спину. Затем выполнить следующие действия:

- 1) расстегнуть стесняющую дыхание одежду;
- 2) проверить по подъему грудной клетки, признаки дыхания;
- 3) проверить наличие пульса (на лучевой артерии у запястья или на сонной артерии на шее);
- 4) проверить состояние зрачка (узкий или широкий); широкий неподвижный зрачок указывает на отсутствие кровообращения мозга.

Определение состояния пострадавшего должно быть проведено быстро, в течение 15–20 секунд.

Если пострадавший в сознании, но до того был в обмороке или продолжительное время находился под электрическим шоком, то ему необходимо обеспечить полный покой до прибытия врача и дальнейшее наблюдение в течение 2–3 часов. Ни в коем случае нельзя позволять пострадавшему двигаться: отсутствие тяжелых симптомов после поражения не исключает возможности последующего ухудшения состояния.

При тяжелом состоянии или отсутствии сознания нужно вызвать врача (скорую помощь) на место происшествия. В случае невозможности быстро вызвать врача необходимо срочно доставить пострадавшего в лечебное учреждение.

При отсутствии сознания, но сохранившемся дыхании, пострадавшего нужно удобно уложить, создать приток свежего воздуха, давать нюхать нашатырный спирт, обрызгивать водой, растирать и согревать тело. Если пострадавший плохо дышит, очень редко, поверхностно или, наоборот, судорожно, как умирающий, следует делать искусственное дыхание.

При отсутствии признаков жизни (дыхания, сердцебиения, пульса) нельзя считать пострадавшего мертвым. Смерть в первые минуты после поражения – кажущаяся и обратима при оказании помощи. Пораженному угрожает наступление необратимой смерти в том случае, если ему немедленно не будет оказана помощь в виде искусственного дыхания с одновременным массажем сердца.

При отсутствии пульса и сердцебиения первая помощь заключается в восстановлении сердечной деятельности. Для этого проводится искусственная вентиляция легких и массаж сердца. Больной укладывается на жесткую поверхность, ротовые пути освобождаются от рвотных масс, инородных предметов. Оказывающий помощь человек кладет одну ладонь на другую на край грудины, она находится примерно в солнечном сплетении. Руки должны быть выпрямлены; толчкообразными движениями необходимо совершать движения вниз так, чтобы грудная клетка смещалась вниз на 4–5 см.

После каждого толчка грудной клетке дают распрямиться, при этом руки не убирают. Сделав пятнадцать движений, приступают к вдыханию воздуха в рот. Для этого зажимают нос, нижнюю челюсть отводят вверх, голову запрокидывают, для удобства под шею можно подложить валик. Прижавшись губами к пострадавшему (это можно делать через платок), вдыхают в легкие воздух (о правильности манипуляции говорит поднятие грудной клетки).

Массаж сердца и вдыхание воздуха продолжают до восстановления сердечной деятельности или до приезда скорой.

Переносить пострадавшего следует только в тех случаях, когда опасность продолжает угрожать ему или человеку, оказывающему помощь.

ПРАВИЛА СБОРКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ

Перед сборкой электрической цепи необходимо определить все элементы, которые должны входить в нее в соответствии с принципиальной схемой: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, измерительные приборы, выключатели и переключатели, регулируемые элементы, источники питания и др. Переключатели пределов измерений приборов должны быть установлены в положения, указанные в описании лабораторной работы.

Особое внимание следует обратить на универсальный прибор – мультиметр, в котором наряду с переключателем пределов измерений имеется переключатель рода работы с различными положениями. Требуемое положение также указывается в описании лабораторной работы.

При сборке электрической цепи необходимо придерживаться следующих правил:

1) перед сборкой схемы ознакомиться с электрическим оборудованием и измерительными приборами, предназначенными для проведения данной лабораторной работы;

2) приступая к сборке схемы, необходимо, прежде всего, убедиться в том, что напряжение на стенде отключено;

3) в первую очередь, необходимо собирать главную цепь, которая состоит из последовательно соединенных элементов: резисторов, индуктивных катушек, амперметров, ваттметров и т. д., подключенных к источнику;

4) во вторую очередь, подключать параллельно подсоединяемые элементы, в том числе вольтметры, катушки напряжения ваттметров, осциллограф и др.;

5) при сборке схемы необходимо строго руководствоваться порядком выполнения лабораторной работы (особенно, если схем несколько);

6) при сборке схемы необходимо обеспечивать достаточную плотность и надежность контактов;

7) собранная схема обязательно проверяется всеми членами бригады, выполняющими данную работу, а затем преподавателем или лаборантом.

Не разрешается включать рубильники, вращать рукоятки аппаратов, нажимать на кнопки и совершать подобные действия с приборами и аппаратами, имеющимися в лаборатории и не предназначенными для выполнения работы. **Схема включается под напряжение только с разрешения преподавателя, ведущего занятия, или дежурного лаборанта.**

8) запись показаний приборов в процессе выполнения лабораторной работы следует проводить по возможности одновременно и быстро, строго соблюдая при этом правила эксплуатации измерительных средств;

9) результаты измерений заносятся каждым студентом в конспект-отчет;

10) после выполнения лабораторной работы результаты предъявляются для проверки преподавателю до разборки схемы;

11) разбирать электрическую цепь следует начинать от источника питания, предварительно отключив напряжение питания;

12) после окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в надлежащий порядок: с разрешения преподавателя схема должна быть разобрана, провода убраны, приборы расставлены по своим местам;

13) в течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах; выходить из помещения лаборатории во время занятий студенты могут только с разрешения преподавателя.

Во время работы в лаборатории студенты обязаны выполнять все правила техники безопасности и правила внутреннего распорядка вуза. К выполнению работ допускаются студенты:

1) прошедшие инструктаж по технике безопасности;

2) имеющие в тетради протоколы испытаний к очередной лабораторной работе, выполненные в соответствии с требованиями;

3) ознакомившиеся с целью и порядком выполнения работы, а также с электрической схемой, которая будет применяться для выполнения эксперимента;

4) изучившие теоретический материал, относящийся к выполняемой работе, по рекомендуемым учебным пособиям, конспекту лекций, данному пособию и другой литературе.

Подготовленность студентов к выполнению лабораторных работ проверяется преподавателем индивидуально.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОРГАНИЗАЦИИ ПРАКТИКУМА И СТРУКТУРЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет должен содержать *номер лабораторной работы; тему; цель; общие сведения по изучаемой теме; порядок выполнения работы (схемы экспериментов, изображенные по стандарту (приложение А), таблицы с данными измерений, расчетные формулы, результаты вычислений, все необходимые построения), выводы по проделанной работе.*

Отчет выполняется рукописно в тетради аккуратным почерком, с использованием чертежных инструментов для выполнения таблиц, схем и необходимых построений для конкретной лабораторной работы, или на стандартных листах формата А4 (размеры 210×297 мм) в текстовом редакторе Microsoft Word (шрифт Times New Roman кегль 14, интервал 1,5).

По всем четырем сторонам листа оставляются поля: верхнее, нижнее и правое – 15 мм, левое – 30 мм. Страница должна содержать не менее 28 строк. Вся графическая часть работы (схемы, диаграммы, построения) должны выполняться с помощью графического редактора (например, Microsoft Visio).

Полученные данные наблюдений студент частично обрабатывает в лаборатории, а окончательно – в домашних условиях.

Все необходимые построения следует выполнять аккуратно карандашом, применяя чертежные принадлежности, с соблюдением масштаба, который указывается в виде: $m_U = B/\text{см}$; $m_I = A/\text{см}$. При построении графиков необходимо на осях координат написать обозначения откладываемых величин, единицы их измерений. Вдоль осей координат наносят деления и представляют в масштабе числовые значения. Масштаб на графиках, за исключением особо оговоренных случаев, должен быть равномерным. Для изображения нескольких зависимостей на графике строят несколько вертикальных осей (каж-

дую со своим масштабом). Кривые на графике в этом случае выделяются соответствующим цветом или способом нанесения точек. Рядом с каждой кривой наносят в удобном месте обозначение зависимости. Каждая иллюстрация должна быть расположена после первого упоминания в тексте записи, иметь наименование и пояснительные данные (подрисовочный текст).

Таблицы должны иметь точное краткое название, подписываться сверху в соответствии с номером раздела и порядкового номера таблицы.

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

Каждый студент должен самостоятельно обработать данные опыта и подготовить отчет о проделанной работе. Если при выполнении лабораторной работы применяется персональный компьютер и соответствующие программные средства, то в отчет должна вклеиваться распечатка результатов.

При защите работы студент должен объяснить любой выполненный опыт или расчет и ответить на дополнительные вопросы преподавателя по данной теме.

Студенты, не представившие отчет и не получившие зачет по предыдущей работе, к выполнению последующих работ не допускаются. Отработка пропущенных лабораторных работ производится в дополнительное время по согласованию с преподавателем.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Цель работы: 1) изучить устройства, принцип действия электромеханических и цифровых измерительных приборов; 2) научиться проводить измерения тока, напряжения и мощности в электрических цепях.

Общие теоретические сведения

Измерение – это процесс определения физической величины с помощью технических средств. **Мера** – это средство измерения физической величины заданного размера. **Измерительный прибор** – это средство измерения, в котором вырабатывается сигнал, доступный для восприятия наблюдателем. Меры и приборы подразделяются на образцовые и рабочие. *Образцовые меры и приборы служат для поверки по ним рабочих средств измерений. Рабочие меры и приборы служат для практических измерений.*

1. Классификация электроизмерительных приборов:

1. По физическим явлениям (на которых основана работа) измерительные приборы можно разделить на *электромеханические* и *электронные*.

Классификация электромеханических приборов зависит от способа преобразования электромагнитной энергии в механическую.

Электронные электроизмерительные приборы представляют собой сложные устройства, содержащие большое число преобразователей электрических сигналов, выполняющих различные функции.

2. По характеру и виду измеряемых величин электроизмерительные приборы подразделяются на измерители: тока (амперметры, миллиамперметры и т. д.); напряжения (вольтметры, мили- и кило-вольтметры и т. д.); мощности (ваттметры); энергии (счетчики); сдвига фаз (фазометры).

3. По виду выдаваемой информации выделяют *аналоговый прибор* – измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины. В этих приборах непрерывная измеряемая величина вызывает подобное ей непрерывное отклонение указателя по шкале, то есть аналоговая величина представляет собой подобие другой величины. К аналоговым приборам относятся приборы, у которых указатель жестко связан с подвижной частью измерительного механизма. *Цифровой прибор* – измерительный прибор, автоматически выдающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представлены в цифровой форме.

4. По способу выдачи измерительной информации: *показывающий* – измерительный прибор, допускающий отсчет показаний; *регистрирующий* – прибор, в котором происходит регистрация показаний. Регистрирующие приборы, в которых предусмотрена запись показаний в форме диаграммы, называют самопишущими.

5. По характеру установки на месте применения измерительные приборы могут быть *стационарные* и *переносные*.

6. По степени защищенности: обыкновенные, пыле-, водозащищенные, герметические и др.

2. Основные характеристики электроизмерительных приборов. *Уравнение преобразования* $Y = f(X)$ – зависимость между входной X и выходной Y величиной. Вид уравнения преобразования определяется конструктивными параметрами прибора.

Чувствительность измерительного прибора определяется из уравнения преобразования (1.1):

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (1.1)$$

где ΔY – изменения сигнала на выходе прибора;
 ΔX – изменения сигнала на входе прибора.

Величина, обратная чувствительности $\alpha = 1/S$ является **ценой деления**.

Порог чувствительности – минимальное значение входной величины, которое можно обнаружить с помощью данного прибора.

Диапазон измерений – область значений измеряемой величины, для которой показания прибора соответствуют его классу точности. Диапазон измерений может состоять из нескольких поддиапазонов.

Область рабочих частот – полоса частот, в пределах которой погрешность измерительного прибора, вызванная изменением частоты, соответствует паспортному значению.

Класс точности – обобщенная характеристика, определяемая пределами допустимых основных и дополнительных погрешностей:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta X}{X_{\text{пр}}} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

где ΔX – абсолютная погрешность;

$X_{\text{пр}}$ – предельное значение шкалы прибора.

Класс точности прибора отличается от его **относительной погрешности**:

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

где X – текущее значение измеряемой величины.

Основные параметры измерительного прибора указаны на шкале или в его паспортных данных. Обозначения, наносимые на шкалы электроизмерительных приборов и их вспомогательные части, нормируются ГОСТ 23217–78 «Приборы электроизмерительные аналоговые с непосредственным отсчетом. Наносимые условные обозначения» и приведены в приложении А.

3. Принцип действия некоторых электроизмерительных приборов

3.1 Аналоговые электромеханические приборы. Измерительный механизм аналоговых электромеханических приборов имеет, как правило, подвижную и неподвижную части. *Электромагнитная энергия, подведенная к прибору из измерительной цепи, преобразуется в механическую энергию углового перемещения подвижной части относительно неподвижной. По перемещению подвижной части судят об измеряемой величине.*

В зависимости от того, какое физическое явление положено в основу работы прибора, различают системы: магнитоэлектрическую, электростатическую, электромагнитную, электродинамическую, тепловую и др.

Расшифровка условных обозначений, нанесенных на шкалы электромеханических приборов, приведены в приложении Б.

Магнитоэлектрическая система (МЭ). *Работа приборов этой системы основана на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля измеряемого тока, проходящего по обмотке подвижной катушки (рамки) (рис. 1.1).*

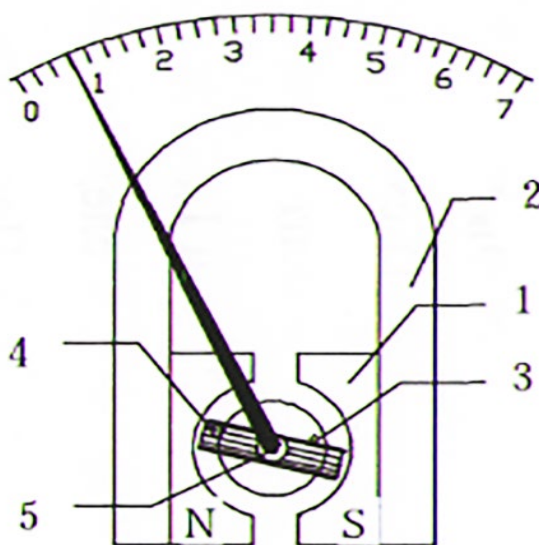


Рисунок 1.1 – Устройство прибора магнитоэлектрической системы

Магнитное поле создается между полюсными наконечниками постоянного магнита 2 и цилиндрическим сердечником 3 из магнитомягкого материала. Легкая подвижная рамка 4 насажена на ось 5 и может поворачиваться вокруг сердечника в сильном и достаточно однородном радиальном магнитном поле зазора. К рамке прикреплена стрелка (или зеркальце), которая удерживается в нулевом положении двумя пружинами. При любом угле поворота рамки нормаль к плоскости, в которой находятся витки, перпендикулярна вектору магнитной индукции $\vec{B}$ магнитного поля постоянного магнита.

При протекании по рамке постоянного тока I на ее витки действует пара сил, создающая вращающий момент (1.4):

$$\vec{M}_{\text{вр}} = [\vec{m}\vec{B}] \quad (1.4)$$

где $\vec{m} = w \cdot I \cdot \vec{S}$ – магнитный момент рамки;

w и S – число витков и площадь соответственно.

Противодействующий момент $M_{\text{пр}}$ создают пружины:

$$M_{\text{пр}} = k \cdot \varphi \quad (1.5)$$

где k – коэффициент упругости пружины;

φ – угол поворота рамки.

В положении равновесия $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$, поэтому $\varphi = \frac{w \cdot S \cdot B}{k} \cdot I$. Отсюда следует, что угол поворота рамки (и стрелки прибора) пропорционален измеряемому току, следовательно шкала прибора магнитоэлектрической системы равномерная.

Достоинства магнитоэлектрических приборов: большая точность, обусловленная высокой стабильностью элементов измерительного механизма и незначительным влиянием внешних полей (изготавливаются вплоть до самого высокого 0,05 класса точности); нечувствительность к влиянию внешних магнитных полей; высокая чувствительность и малое собственное потребление энергии; хорошее успокоение и равномерность шкалы. *Недостатки приборов:*

сложность изготовления, плохая перегрузочная способность, влияние температуры на точность измерения и невозможность (без дополнительных устройств) использования в цепях переменного тока.

Электромагнитная система (ЭМ). Работа приборов электромагнитной системы основана на взаимодействии магнитного поля измеряемого тока с подвижным ферромагнитным сердечником.

При прохождении по неподвижной катушке 1 (рис. 1.2) измеряемого тока I возникает магнитное поле, пропорциональное току. Магнитное поле, действуя на сердечник 2, намагничивает его. В результате он втягивается внутрь катушки. При этом сердечник, эксцентрично насаженный на ось 3, поворачивается до тех пор, пока вращающий момент $M_{вр}$ не уравнивается противодействующим моментом $M_{пр}$ пружин 4.

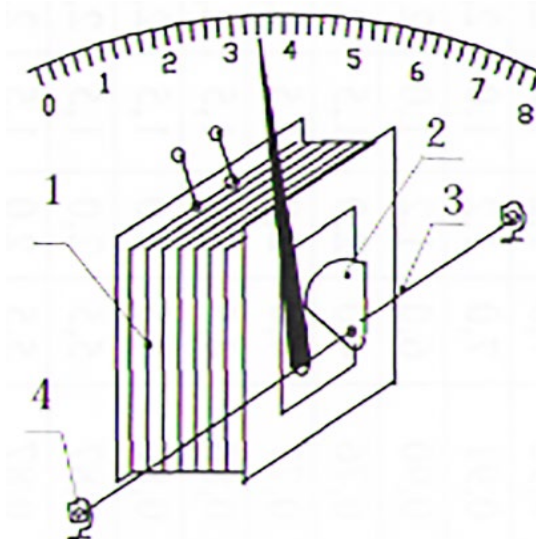


Рисунок 1.2 – Устройство прибора электромагнитной системы

Магнитное поле катушки пропорционально измеряемому току $H \sim I$. Намагниченность сердечника в рабочих диапазонах частоты и амплитуды пропорциональна магнитному полю, а следовательно, току. Поэтому вращающий момент $M_{вр}$ будет пропорционален квадрату тока.

Противодействующий момент пружин $M_{\text{пр}} = k_1 \cdot \varphi$. Равновесие стрелки будет достигнуто при равенстве моментов $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$, тогда угол отклонения равен $\varphi = k \cdot I^2$.

Отсюда следует, что шкала прибора должна быть квадратичной, но подбором сердечника специальной формы добиваются более равномерной шкалы на большей части диапазона измерения. Однако начальная часть шкалы прибора при этом выходит за класс его точности и считается нерабочей. Поскольку φ является функцией I^2 , знак угла поворота не зависит от направления тока в катушке. Поэтому приборы ЭМ системы одинаково пригодны для измерений в цепях постоянного и переменного тока.

Достоинства: возможность измерения постоянных и переменных токов; простота конструкции; прочность.

Недостатки: неравномерность шкалы; малая точность; малая чувствительность; малый частотный диапазон; влияние внешних магнитных полей; невозможность измерения на начальном участке шкалы.

Электростатическая система (ЭС). Принцип действия электростатического прибора основан на взаимодействии электрически заряженных проводников. Измерительная часть представляет плоский воздушный конденсатор, состоящий из неподвижного 1 и подвижного 2 электродов (рис. 1.3).

При подаче напряжения U на электроды между ними возникает сила электростатического взаимодействия: $F = k^1 \cdot q^2 = k \cdot U^2$. Под действием этой силы подвижная пластина 2, закрепленная вместе со стрелкой (зеркальцем) на оси 3, втягивается в пространство между неподвижными пластинами, создавая вращающий момент $M_{\text{вр}} \sim U^2$.

Движение пластины прекращается, когда противодействующий момент закрученной пружины $M_{\text{пр}} \sim k_1 \cdot \varphi$, становится равным вращающему моменту.

Из условия равенства моментов следует, что угол отклонения φ определяется квадратом измеряемого напряжения $\varphi = k \cdot U^2$.

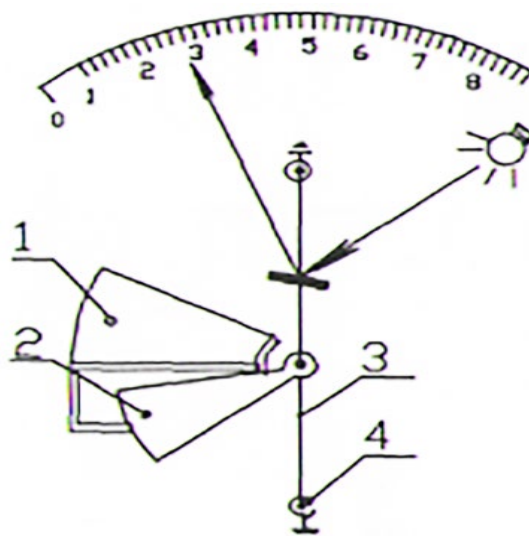


Рисунок 1.3 – Устройство электростатического вольтметра

Квадратичная зависимость показаний ЭС прибора вносит те же особенности в его характеристику, что и для приборов электромагнитной системы: возможность измерения постоянных и переменных напряжений; неравномерность шкалы; наличие нерабочего участка в начале шкалы.

Достоинства приборов электростатической системы: высокое входное сопротивление (более 10^{10} Ом); возможность измерения постоянных и переменных напряжений; достаточно широкий частотный диапазон. *Недостатки приборов электростатической системы:* низкая чувствительность; невысокая точность; необходимость экранировки от внешних электрических полей; чувствительность к чистоте и влажности воздуха, чистоте поверхности изоляторов входных клемм; неравномерность шкалы; наличие нерабочего участка в начале шкалы.

Электродинамическая система (ЭД). Эта система представляет собой две катушки (рис. 1.4), одна из которых неподвижная 1, а другая – по-

движная 2. Обе катушки подключаются к сети, и взаимодействие их магнитных полей приводит к повороту подвижной катушки относительно неподвижной.

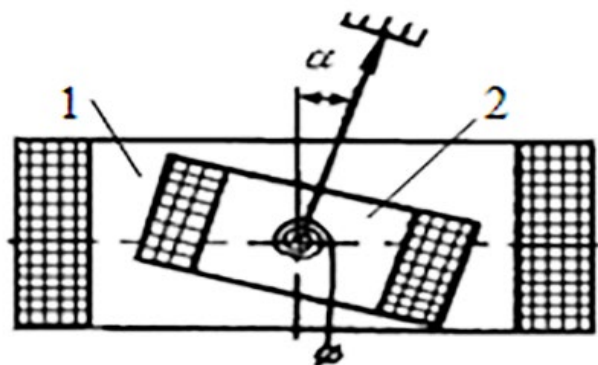


Рисунок 1.4 – Устройство электродинамической системы

Из уравнения $\alpha = k^1 \cdot I_1 \cdot I_2$ видно, что шкала электродинамической системы имеет квадратичный характер. Для устранения этого недостатка подбирают геометрические размеры катушек таким образом, чтобы подучить шкалу, близкую к равномерной.

Эти системы чаще всего используются для измерения мощности, то есть в качестве ваттметров. В этом случае шкала ваттметра равномерная.

Достоинства приборов электродинамической системы: высокая точность (класс точности до 0,05); возможность использования в цепях постоянного и переменного тока. *Недостатки приборов:* меньшая по сравнению с приборами магнитоэлектрической системы чувствительность; ощутимое влияние внешних магнитных полей; сравнительно большое потребление энергии из измерительной цепи.

На базе измерительных механизмов ЭД системы выпускают амперметры, вольтметры, ваттметры, частотомеры и фазометры.

Разновидностью ЭД являются **ферродинамические приборы**, принцип действия которых такой же, как и приборов электродинамической системы, но магнитное поле неподвижной обмотки значительно усилено за счет введения в него магнитопровода из листовой электротехнической стали.

Индукционная система (ИД). Приборы индукционной системы получили широкое распространение для измерения электрической энергии.

Электрический счетчик содержит магнитопровод 1 сложной конфигурации (рис. 1.5), на котором размещены две катушки: напряжения 2 и тока 3. Между полюсами электромагнита помещен алюминиевый диск 4 с осью вращения 5.

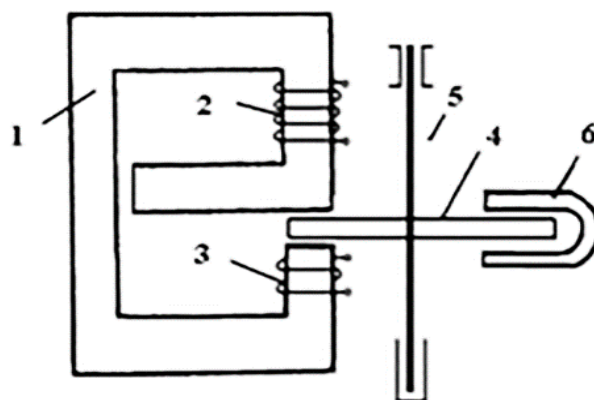


Рисунок 1.5 – Устройство индукционной системы

Принцип действия индукционной системы основан на взаимодействии магнитных потоков, создаваемых катушками тока и напряжения с вихревыми токами, наводимыми магнитным полем в алюминиевом диске.

Вращающий момент, действующий на диск, определяется формулой (1.6):

$$M_{\text{вр}} = k_1 \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot \sin\psi \quad (1.6)$$

где Φ_U — часть магнитного потока, созданного обмоткой напряжения и проходящего через диск счетчика, Вб;

Φ_I — магнитный поток, созданный обмоткой тока, Вб;

ψ — угол сдвига между Φ_U и Φ_I .

Магнитный поток Φ_U пропорционален напряжению: $\Phi_U = k_3 \cdot U$. Магнитный поток Φ_I пропорционален току: $\Phi_I = k_3 \cdot I$.

3.2 Цифровые измерительные приборы. *Цифровые измерительные приборы автоматически преобразуют непрерывную измеряемую величину в дискретную форму, подвергают цифровому кодированию и выдают результат измерения в цифровом виде.* Любая непрерывная величина, ограниченная некоторыми предельными значениями, может быть дискретизирована во времени и квантована по уровню.

Дискретизация – преобразование непрерывной величины ($x(t)$) в дискретную (x_i), при этом сохраняются ее мгновенные значения только в определенные моменты времени (t_i), следовательно, при дискретизации теряется часть информации. **Шаг дискретизации** – промежуток времени Δt между соседними отсчетами. Преобразование мгновенного значения напряжения в цифровой код осуществляется аналого-цифровым преобразователем, основными характеристиками которого являются количество разрядов и быстродействие.

Цифровые измерительные приборы многопредельны, универсальны; предназначены для измерения постоянного и переменного напряжения, тока, сопротивления, частоты, фазы, мощности, интервалов времени, емкости и других параметров.

Достоинства (в сравнении с аналоговыми приборами): более широкий рабочий диапазон частот; высокая точность; быстродействие; получение результатов измерения в удобной для считывания форме; возможность ввода измерительной информации в компьютер. Широкое применение имеют комбинированные цифровые приборы типа вольтамперметров, которые, как правило, имеют высокое входное сопротивление в режиме измерения напряжения и низкое в режиме измерения тока.

Мультиметр. Мультиметр является универсальным прибором для измерения постоянного и переменного тока и напряжения, сопротивления постоянному току, проверки р-п переходов. Мультиметр имеет преобразователь

среднеквадратичного значения, поэтому он обеспечивает измерение истинного среднеквадратичного значения переменного напряжения (тока) произвольной формы, с постоянной и без постоянной составляющей.

Органы управления мультиметра. Кнопки: *POVER* – включение или выключение питания прибора; *V, mA, Ω* – режим измерения напряжения, тока, сопротивления соответственно. **Гнезда:** COM – общий (для отрицательного провода). COM-V, Ω – для измерения напряжения, сопротивления.

Выбор функций и предела измерений производится с помощью переключателя. При измерении постоянных напряжений *I* токов переключатель пределов устанавливается на требуемый предел. Если измеряемое значение заранее неизвестно, необходимо установить на максимальный предел, а затем уменьшать его до тех пор, пока не получится необходимая точность измерений. Диапазон рабочих частот от 45 до 450 Гц. Точность меняется при изменении предела измерений (см. паспортные данные прибора).

Порядок выполнения работы

1. Изучите приборы эксперимента. При этом необходимо учитывать, что измерение тока производится амперметром. Он включается последовательно участку цепи, в котором необходимо измерить ток. Измерение напряжения производится вольтметром, который включается параллельно участку, на котором нужно измерить напряжение. Активная мощность измеряется ваттметром, который включается с учетом перемычки.

2. Сделайте записи в таблицу 1.1 по каждому прибору отдельно.

3. Соберите экспериментальную электрическую цепь (рис. 1.6) для измерения величин.

4. Подайте напряжение. Входное напряжение цепи задается преподавателем (10–40 В). Запишите все показания приборов в таблицу 1.2.

Лабораторная работа 1.
Электроизмерительные приборы

4. В соответствии с данными таблицы 1.2, вычислите значения сопротивления и мощности нагрузки (два последних столбца) при различных значениях напряжения питания U , данные занесите в таблицу 1.2.

5. Сделайте выводы по результатам лабораторной работы.

Таблица 1.1 – Данные электроизмерительных приборов

Прибор	Система	Род тока	Класс точности	Цена деления	Номинальная величина

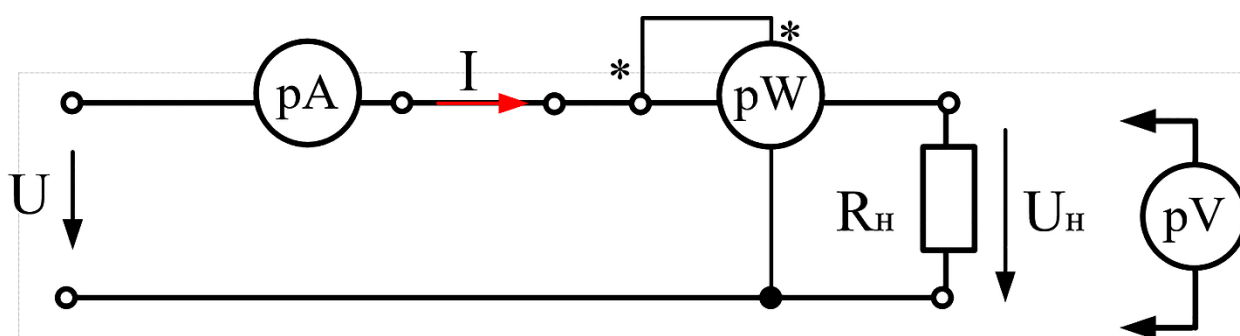


Рисунок 1.6 – Схема экспериментальной цепи для проверки параметров электроизмерительной системы

Таблица 1.2 – Данные эксперимента

$U, В$	Измеренные значения				Вычисленные значения	
	$R_H, Ом$	$U_H, В$	$I, А$	$P, Вт$	$R, Ом$	$P, Вт$

Контрольные вопросы

1. По каким параметрам классифицируются электроизмерительные приборы?
2. Что такое мера?
3. Как определить класс точности прибора?
4. Опишите принцип действия магнитоэлектрической системы.
5. По какой формуле определяется относительная погрешность?

6. Назовите основные характеристики электроизмерительных приборов.
7. Как по виду выдаваемой информации делятся приборы?
8. Что такое измерение?
9. Что такое чувствительность прибора?
10. Как на панели прибора обозначается принцип действия всех систем?
11. Как определить цену деления прибора?
12. Опишите принцип действия электромагнитной системы.
13. Каким прибором измеряется напряжения, как он включается в цепь?
14. Каким прибором измеряется ток, как он включается в цепь?
15. Для чего используются рабочие меры и приборы?
16. Как в электродинамической системе приборов устраняют квадратичный характер шкалы?
17. Опишите принцип действия электродинамической системы.
18. Рассмотрите принцип работы мультиметра.
19. Как рассчитывается абсолютная погрешность? От чего эта величина зависит?
20. Как рассчитывается относительная погрешность? От чего эта величина зависит?

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Что измеряют магнитоэлектрическими приборами:
 - 1) электрический ток;
 - 2) магнитодвижущую силу;
 - 3) магнитную индукцию;
 - 4) электрический потенциал.
2. Какой измерительный механизм называют электродинамическим?
 - 1) измерительный механизм, в котором вращающий момент возникает в результате взаимодействия магнитного поля, создаваемого электромагнитом,

и подвижного контура с током;

2) измерительный механизм, в котором вращающий момент создается путем взаимодействия двух контуров с током, один из которых подвижный;

3) измерительный механизм, в котором вращающий момент создается благодаря действию магнитного поля неподвижной катушки на ферромагнитное тело, являющееся подвижной частью механизма.

3. Какую величину измеряет вольтметр?

- 1) напряжение;
- 2) мощность;
- 3) силу тока;
- 4) сопротивление.

4. Какую погрешность показывает класс точности?

- 1) относительную;
- 2) абсолютную;
- 3) приведенную.

5. Как определяется цена деления прибора?

- 1) отношение предела измерений к количеству измерений;
- 2) отношение количества делений шкалы к пределу измерений;
- 3) отношение предела измерений к количеству делений шкалы;
- 4) отношение абсолютной погрешности к текущему значению измеряемой величины.

6. Какой показатель нельзя определить из условных обозначений на шкале прибора?

- 1) абсолютную погрешность;
- 2) приведенную погрешность;
- 3) условия применения прибора в работе;
- 4) измерительную систему прибора.

7. Что не является недостатком электростатической системы электроизмерительных приборов?

- 1) низкая чувствительность;
- 2) влияние температуры на точность измерения;
- 3) необходимость экранировки от внешних электрических полей;
- 4) невысокая точность.

8. Для какой измеряемой величины используются приборы индукционной системы?

- 1) электрической энергии;
- 2) мощности;
- 3) силы тока;
- 4) напряжения.

9. К какой системе электроизмерительных приборов относятся ферродинамические приборы?

- 1) магнитоэлектрической;
- 2) электромагнитной;
- 3) электродинамической;
- 4) электростатической.

10. Какая из основных характеристик электроизмерительных приборов может иметь несколько подвеличин?

- 1) область рабочих частот;
- 2) порог чувствительности;
- 3) диапазон измерений;
- 4) чувствительность.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Цель работы: *приобрести навыки исследования цепи постоянного тока при последовательном и параллельном соединении элементов.*

Общие теоретические сведения

Любая электрическая цепь содержит *источники (генераторы)* электрической энергии и *потребители (приемники)* электрической энергии.

Источник питания – это устройство, которое вырабатывает электрический ток, то есть любой вид энергии преобразовывает в электрическую энергию. Источником питания постоянного тока являются гальванические элементы, аккумуляторы, машины постоянного тока, различные устройства, преобразующие (выпрямляющие) переменный ток в постоянный.

Если источник энергии постоянного тока подключить к замкнутой цепи, то в этой замкнутой цепи возникнет постоянный электрический ток. Электрическим током называется направленное перемещение электрических зарядов. За положительное направление тока принято условно считать направление движения положительных зарядов от плюса источника к минусу.

Кроме источников электрической энергии, в электрической цепи всегда присутствуют **приемники (потребители)** электрической энергии. В этих устройствах электрическая энергия преобразуется в энергию другого вида: световую, тепловую, механическую, магнитную и т. д.

Потребители в электрических цепях постоянного тока характеризуются активным сопротивлением R [Ом]. Они могут быть подключены к источнику питания последовательно, параллельно или смешано. Расчеты электрических цепей осуществляются по основным законам электротехники – закон Ома, законы Кирхгофа, закон Джоуля-Ленца, баланс мощностей.

Зависимость тока от электродвижущей силы (ЭДС) для неразветвленной цепи с одним источником питания определяется законом Ома, согласно которому сила тока прямо пропорциональна ЭДС и обратно пропорциональна сопротивлению всей цепи (2.1):

$$I = \frac{E}{R_{\text{вн}} + \sum_{i=1}^n R_i} \quad (2.1)$$

где E – ЭДС источника питания;

$R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление источника питания;

$\sum_{i=1}^n R_i$ – сумма сопротивлений приемников.

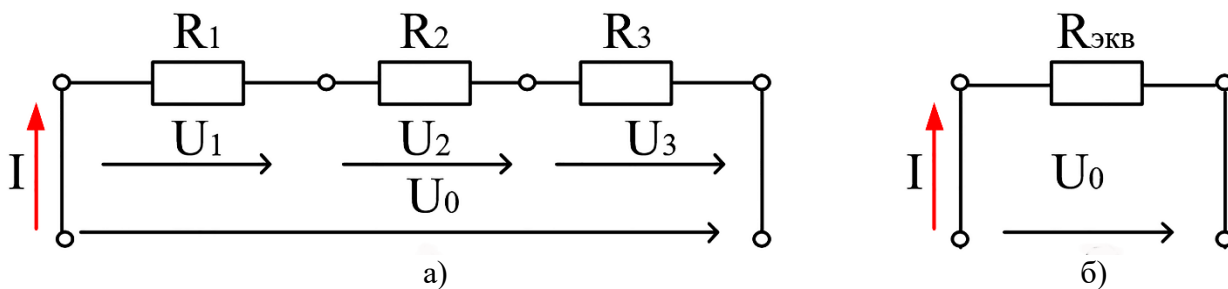
Иногда источник питания задается напряжением на зажимах (то есть у источника нет внутреннего сопротивления), тогда формула закона Ома несколько упрощается и имеет вид выражения (2.2):

$$I = \frac{U}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (2.2)$$

где U – напряжение на зажимах источника питания.

В многоконтурных (сложных), разветвленных электрических схемах сопротивления соединяются между собой как последовательно (рис. 2.1), так и параллельно (рис. 2.2). Если в схеме используется последовательное и параллельное соединения, то такой вид соединения называется *смешанным*.

При **последовательном соединении элементов** *конец цепи первого потребителя присоединяют к началу второго, а конец второго к началу третьего и т. д. Начало цепи первого и конец последнего потребителей подключается к зажимам источника (рис. 2.1, а).*



а) схема цепи последовательного соединения элементов; б) эквивалентная схема замещения

Рисунок 2.1 – Электрическая цепь постоянного тока с последовательным соединением

Эквивалентное (входное) значение сопротивлений при последовательном соединении элементов (рис. 2.1, б) определяется по формуле (2.3):

$$R_{\text{ЭКВ}} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (2.3)$$

Эквивалентное сопротивление для схемы (рис. 2.1, а) рассчитывается как сумма трех последовательно соединенных элементов (2.4):

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_{1,2,3} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2.4)$$

Основные величины, характеризующие последовательное соединение:

1) ток в такой цепи является общим для всех потребителей, определяется в соответствии с законом Ома:

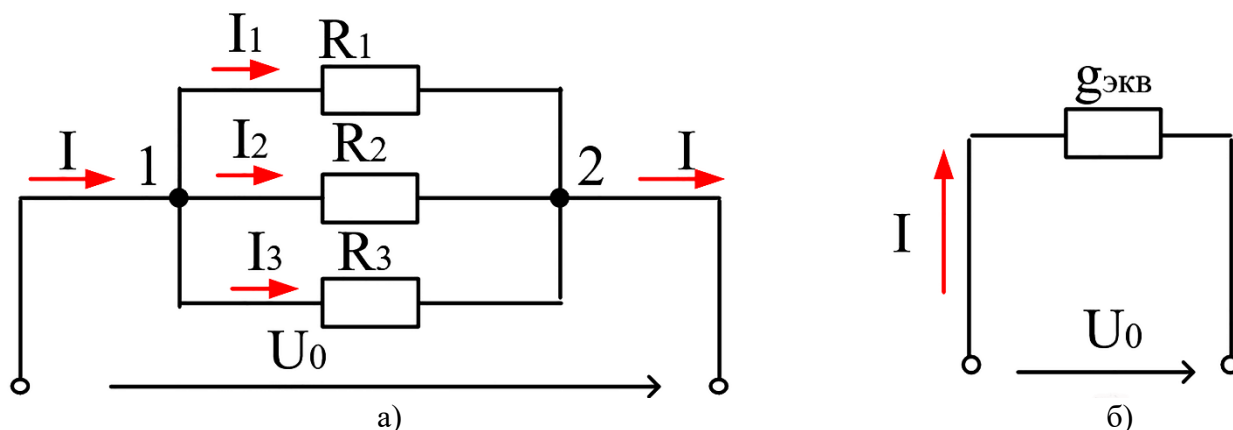
$$I = \frac{U_0}{R_{\text{ЭКВ}}} \quad (2.5)$$

2) на каждом из потребителей свое значение напряжения.

Падение напряжения на отдельном потребителе определяется сопротивлением потребителя и проходящим через него током: $U_k = R_k \cdot I$.

Входное (общее) напряжение рассчитывается: $U_0 = U_1 + U_2 + U_3$.

При **параллельном соединении потребителей** их начала соединяются в одну точку (первый узел), а концы – в другую (второй узел). Оба узла подключаются к клеммам источника питания (рис. 2.2, а).



а) схема цепи параллельного соединения элементов; б) эквивалентная схема замещения

Рисунок 2.2 – Электрическая цепь постоянного тока с параллельным соединением

Существуют частные случаи параллельного соединения элементов в электрической схеме:

1) для двух, параллельно соединенных сопротивлений, эквивалентное сопротивление определяется формулой (2.6):

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_{1,2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.6)$$

2) если в схеме соединено три элемента (рис.2.2, а):

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_{1,2,3} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3} \quad (2.7)$$

В общем же случае при параллельном соединении эквивалентное сопротивление является эквивалентной проводимостью (рис. 2.2, б):

$$q_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (2.8)$$

Основные величины, характеризующие параллельное соединение:

1) напряжение при параллельном соединении элементов является общим (одинаковым) для всех потребителей (рис. 2.2, а) ($U_0 = U_1 = U_2 = U_3$).

Для расчета используется закон Ома:

Лабораторная работа 2. Исследование линейной электрической цепи постоянного тока с последовательным и параллельным соединением приемников электрической энергии

$$U_0 = I_0 \cdot R_{\text{экв}} \quad (2.9)$$

2) на каждом из потребителей свое значение тока; значение тока на потребителе определяется по закону Ома:

$$I_k = \frac{U_0}{R_k} \quad (2.10)$$

Входное (общее) значение тока определяется по первому закону Кирхгофа. Для схемы (рис. 2.2, а) уравнение имеет вид: $I_0 = I_1 + I_2 + I_3$.

В любой электрической цепи должен соблюдаться энергетический баланс, то есть **баланс мощностей**. Это интерпретация закона сохранения энергии в электротехнике. Составление уравнения баланса мощностей позволяет проверять правильность решения рассматриваемых задач.

В любой электрической цепи алгебраическая сумма мощностей всех источников электрической энергии (в частности источников ЭДС и тока) должна быть равна арифметической сумме мощностей всех приемников (в частности резистивных элементов) и вспомогательных элементов этой цепи (2.11):

$$\sum_{K=1}^m E_K \cdot I_K = \sum_{K=1}^n R_K \cdot I_K^2 \quad (2.11)$$

где $\sum_{K=1}^m E_K \cdot I_K$ – сумма мощностей, развиваемых источниками схемы;
 $\sum_{K=1}^n R_K \cdot I_K^2$ – сумма мощностей всех приемников схемы.

Если направление тока совпадает с направлением ЭДС и в результате расчета получено положительное значение тока, то источник вырабатывает (генерирует) электрическую энергию, то есть работает в режиме генератора. Если же получено отрицательное значение тока, то произведение $E_K \cdot I_K$ отрицательно, значит источник работает в режиме потребителя и является приемником электрической энергии.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Что такое источник электрической энергии? Приведите примеры.
2. Что такое потребитель электрической энергии? Приведите примеры.
3. Раскройте понятие и приведите основные величины последовательного соединения элементов.
4. Раскройте понятие и приведите основные величины параллельного соединения элементов.
5. Как включается в схему для измерения амперметр, вольтметр? Изобразите схемы.

Порядок выполнения работы

Опыт 1. Последовательное соединение элементов

1. Прежде чем приступить к эксперименту, необходимо сделать теоретический расчет исходной схемы (рис. 2.3) с теми данными, которые задаются преподавателем. Все значения и расчеты вносятся в таблицу 2.1.

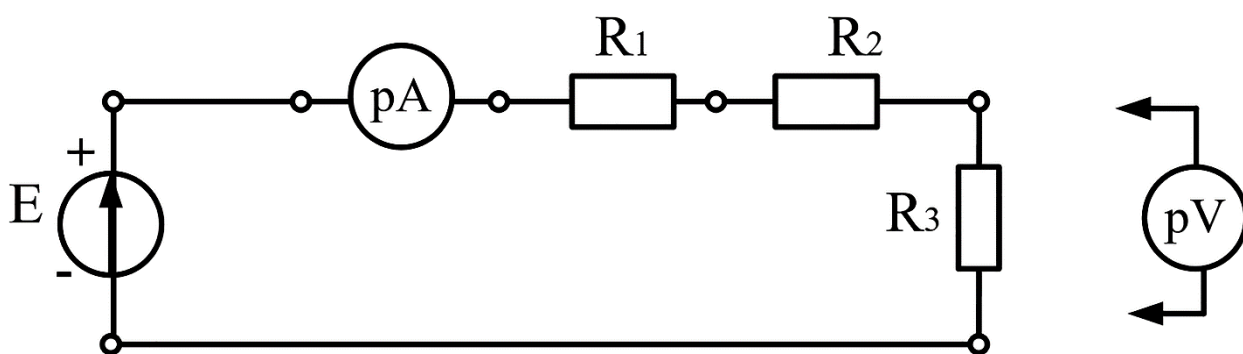


**Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной цепи
для изучения последовательного соединения элементов**

2. Соберите электрическую цепь в соответствии с рисунком 2.3, используя значения сопротивлений, заданные преподавателем. Подключите данную электрическую цепь к постоянному напряжению.
3. Выполните измерения электрических величин (тока и напряжения) на каждом элементе цепи. Показания приборов запишите в таблицу 2.2.

Лабораторная работа 2. Исследование линейной электрической цепи постоянного тока с последовательным и параллельным соединением приемников электрической энергии

Таблица 2.1 – Последовательное соединение элементов (теоретический расчет)

Номер п/п	Номинальные значения				Вычисления					
	$E,$ В	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_{\text{экв}},$ Ом	$I_0,$ А	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$U_3,$ В	$U_0,$ В
1										
n										

Таблица 2.2 – Последовательное соединение элементов (эксперимент)

Номер п/п	Измеряемые величины						Вычисления			
	$E,$ В	$I_0,$ А	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$U_3,$ В	$U_0,$ В	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_{\text{экв}},$ Ом
1										

4. Выполните расчет сопротивлений каждого элемента цепи по закону Ома и найдите эквивалентное сопротивление цепи.

Формулы для расчета значений таблицы 2.1:

1) входное сопротивление:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3, [\text{Ом}];$$

2) ток на входе цепи (входной ток):

$$I_0 = \frac{E}{R_{\text{экв}}}, [\text{А}];$$

3) напряжение на каждом элементе:

$$U_1 = I_0 \cdot R_1; U_2 = I_0 \cdot R_2; U_3 = I_0 \cdot R_3, [\text{В}];$$

4) входное напряжение:

$$U_0 = U_1 + U_2 + U_3, [\text{В}]$$

Для таблицы 2.2 расчет сопротивления элементов:

$$R_1 = \frac{U_1}{I_0}; R_2 = \frac{U_2}{I_0}; R_3 = \frac{U_3}{I_0}, [\text{Ом}]$$

5. Сравните значения теоретического расчета и экспериментальных данных (табл. 2.1, 2.2). Запишите уравнения баланса мощностей для одних и тех же значений теоретического расчета и экспериментальных данных. Решая эти уравнения, проверьте выполнение баланса мощностей.

$$\text{Баланс мощностей: } P_{\text{ист}} = P_{\text{потр}}; E \cdot I_0 = I_0^2 \cdot (R_1 + R_2 + R_3).$$

6. Сделайте выводы по опыту 1.

Опыт 2. Параллельное соединение элементов

1. Прежде чем приступить к эксперименту, необходимо сделать теоретический расчет исходной схемы (рис. 2.4.) с теми данными, которые задает преподаватель. Все значения и расчеты вносятся в таблицу 2.3.

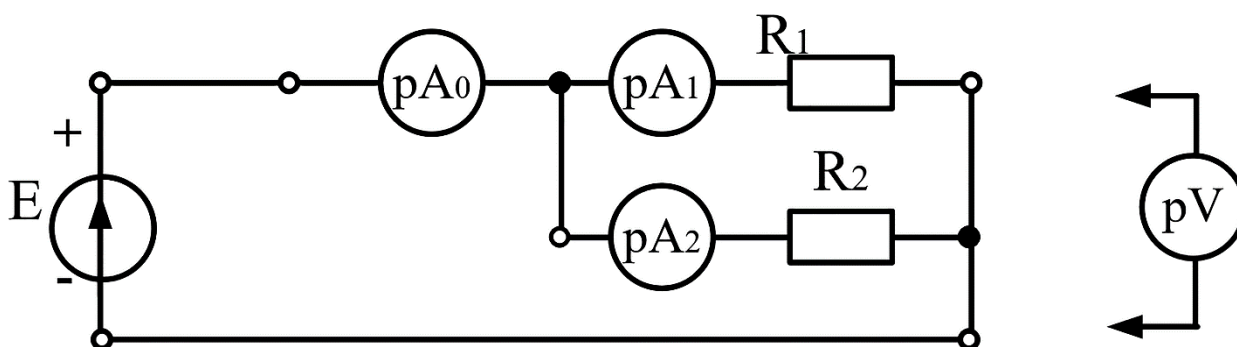


Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной цепи для изучения параллельного соединения элементов

Таблица 2.3 – Параллельное соединение элементов (теоретический расчет)

Номер п/п	Номинальные значения			Вычисления						
	$E,$ В	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_{\text{экв}},$ Ом	$I_0,$ А	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$U_0,$ В	$U_1,$ В	$U_2,$ В
1										
n										

2. Соберите электрическую цепь в соответствии с рисунком 2.4, используя значения сопротивлений, заданные преподавателем. Подключите электрическую цепь к постоянному напряжению.

3. Выполните измерения электрических величин (тока и напряжения) на каждом элементе цепи. Показания приборов запишите в таблицу 2.4.

4. Выполните расчет сопротивлений каждого элемента цепи по закону Ома и найдите эквивалентное сопротивление цепи.

Формулы для расчета значений таблицы 2.3:

1) входное (эквивалентное) сопротивление:

Лабораторная работа 2. Исследование линейной электрической цепи постоянного тока с последовательным и параллельным соединением приемников электрической энергии

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, [\text{Ом}];$$

2) ток на входе цепи (входной ток):

$$I_0 = \frac{E}{R_{\text{экв}}}, [\text{А}];$$

3) токи на параллельном участке (в параллельных ветвях):

$$I_1 = \frac{E}{R_1} = \frac{U_1}{R_1}, \quad I_2 = \frac{E}{R_2} = \frac{U_2}{R_2}, [\text{А}];$$

4) напряжение на каждом элементе: $U_1 = I_1 \cdot R_1$; $U_2 = I_2 \cdot R_2$, [В];

5) входное напряжение: $U_0 = I_0 \cdot R_{\text{экв}}$, [В]

Для таблицы 2.4 сопротивления элементов рассчитывают:

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1}; R_2 = \frac{U_2}{I_2}, [\text{Ом}]$$

При этом входное (эквивалентное) сопротивление:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, [\text{Ом}]$$

Таблица 2.4 – Параллельное соединение элементов (эксперимент)

Номер п/п	Измеряемые величины							Вычисления		
	E , В	I_0 , А	I_1 , А	I_2 , А	U_0 , В	U_1 , В	U_2 , В	R_1 , Ом	R_2 , Ом	$R_{\text{экв}}$, Ом
1										

5. Сравните значения теоретического расчета и экспериментальных данных (табл. 2.3, 2.4). Запишите уравнения баланса мощностей для одинаковых значений теоретического расчета и экспериментальных данных. Решая эти уравнения, проверьте выполнение баланса мощностей.

Баланс мощностей: $P_{\text{ист}} = P_{\text{потр}}$; отсюда $E \cdot I_0 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2$.

6. Сделайте выводы по опыту 2.

После всех расчетов и выводов по опытам 1 и 2 необходимо сравнить оба опыта между собой. Сделайте выводы по работе в целом.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение последовательного соединения.
2. Дайте определение параллельного соединения.
3. Какие величины измеряются в опыте 1? Какие приборы для этого используются?
4. Какие величины измеряются в опыте 2? Какие приборы для этого используются?
5. Сколько и какие приборы используются в схеме для последовательного соединения элементов? Изобразите схему.
6. Сколько и какие приборы используются в схеме для параллельного соединения элементов? Изобразите схему.
7. Какие формулы используются для определения входного сопротивления при последовательном соединении? Объясните их.
8. Какие формулы используются для определения входного сопротивления при параллельном соединении? Объясните их.
9. Проанализируйте определение баланса мощностей для опыта 1.
10. Проанализируйте определение баланса мощностей для опыта 2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ КИРХГОФА В РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ПОСТРОЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ

Цель работы: 1) приобрести навыки исследования цепи постоянного тока с использованием законов Кирхгофа; 2) научиться строить потенциальную диаграмму для заданного контура, доказав правильность проведенного эксперимента.

Общие теоретические сведения

Для любого эксперимента в электротехнике необходимо собрать электрическую цепь. **Электрическая цепь** – это совокупность электротехнических устройств, предназначенных для производства, передачи, преобразования и использования электрического тока. **Электрическая схема** – графическое изображение электрической цепи, включающее в себя условные обозначения устройств, которые показывают соединение этих устройств.

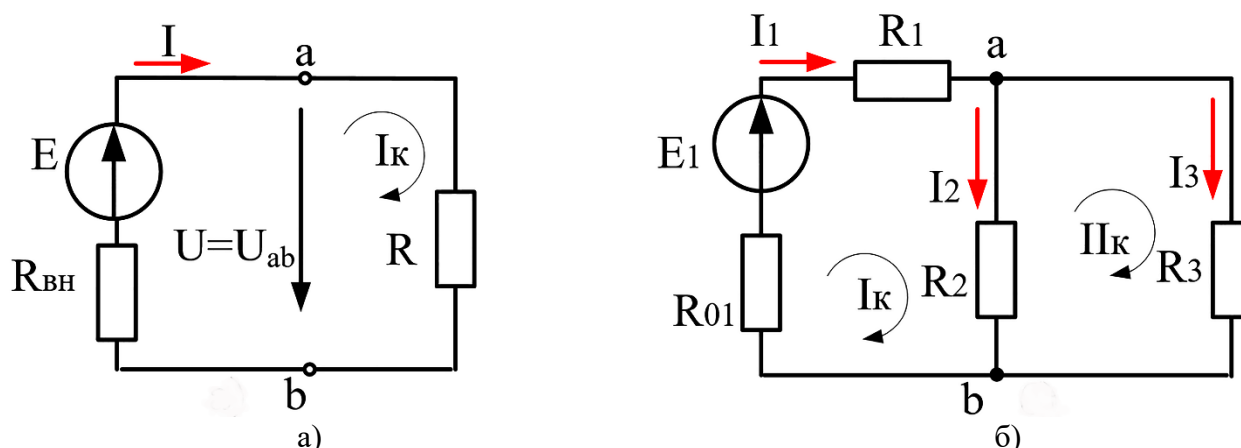
По способу соединения схем (по сложности) выделяются два вида:

1) **неразветвленные (простые) схемы** – последовательное соединение элементов (рис. 3.1, а);

2) **разветвленные (сложные) схемы** – параллельное или смешанное соединение элементов (рис. 3.1, б).

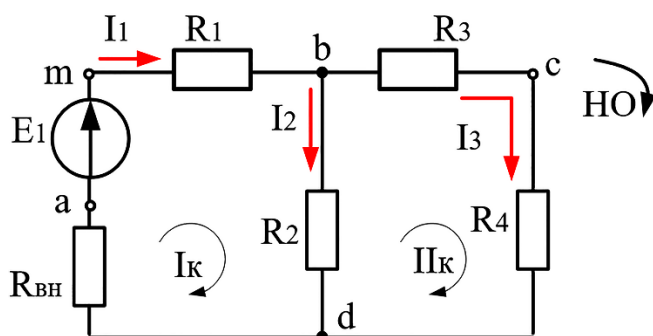
Сложные электрические схемы состоят из узлов, ветвей и контуров (рис. 3.1, б; рис. 3.2).

*Часть электрической схемы, состоящей из одного или нескольких элементов, соединенных последовательно, начинающихся и заканчивающихся в узлах, называется **ветвью**.* По электрической ветви проходит один и тот же ток (в схеме рис. 3.1, б и рис. 3.2 – три ветви).



а) неразветвленная; б) разветвленная

Рисунок 3.1 – Электрическая схема цепи постоянного тока



Если $E \uparrow \uparrow I$, то источник вырабатывает энергию (знак «+»)
Если $E \uparrow \downarrow I$, то источник работает как потребитель (знак «-»)

Рисунок 3.2 – Разветвленная электрическая схема цепи постоянного тока

Узлом называется место (точка) соединения трех и более ветвей. На электрической схеме (рис. 3.1, б) представлены узлы «а» и «b»; на рисунке 3.2 узлы «b» и «d».

Контуром называется замкнутый путь, проходящий по отдельным ветвям электрической схемы, где ни один элемент не повторяется дважды. В электрической схеме (рис. 3.1, а) один контур (простая электрическая схема). На рисунке 3.2 представлены два контура «ambda», «bcdb», а также внешний контур «ambcda».

Для работы любой электрической цепи необходимо наличие источников энергии. На зажимах источника возникает разность потенциалов или напряжение, под воздействием которого во внешней, присоединенной к источнику части цепи, возникает электрический ток. На схеме направление электрического

тока совпадает с направлением ЭДС (рис. 3.2) и указывается стрелкой. В данной схеме три ветви, и соответственно три тока, протекающие по этим ветвям.

Для расчета разветвленных (сложных) цепей применяются законы Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа (для узлов электрических цепей)

Алгебраическая сумма токов, проходящих через узел схемы, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (3.1)$$

Физический смысл первого закона Кирхгофа – заряд в узле не накапливается.

Примечание: входящие в узел токи записываются со знаком «+», выходящие из узла со знаком «–». Для схемы, изображенной на рисунке 3.2, первый закон Кирхгофа для узла «b» имеет вид: $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ или $I_1 = I_2 + I_3$.

Второй закон Кирхгофа (для любого замкнутого контура)

Второй закон Кирхгофа устанавливает зависимость ЭДС от напряжения в замкнутом контуре. Так как контур может быть пассивным (нет источников питания) или активным (есть источники питания), то второй закон Кирхгофа имеет два вида записи.

Для пассивного контура (в контуре нет источников питания): в замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма напряжений на его ветвях равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0 \quad (3.2)$$

Для активного контура (в контуре есть источники питания): в замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма падений напряжений на пассивных элементах равна алгебраической сумме ЭДС этого контура:

$$\sum_{k=1}^n I_k \cdot R_k = \sum_{k=1}^m E_k \quad (3.3)$$

Примечание: если направление ЭДС и направление тока совпадают с выбранным направлением обхода контура, то перед величинами ЭДС и токов ставится знак «+».

Баланс мощностей

В любой электрической цепи алгебраическая сумма мощностей всех источников электрической энергии (в частности источников ЭДС и тока) должна быть равна арифметической сумме мощностей всех приемников (в частности резистивных элементов) и вспомогательных элементов этой цепи (лабораторная работа 2, выражение (2.11)).

Построение потенциальной диаграммы

Потенциальная диаграмма – графическая зависимость потенциала электрической цепи от сопротивления на участке, соответствующего этому потенциалу, то есть график зависимости $\varphi = f(R)$.

Чтобы построить потенциальную диаграмму для замкнутого контура, необходимо выполнить следующие пункты:

- 1) заземлить любую точку замкнутого контура, выбранного для построения диаграммы; потенциал в этой точке будет равен нулю;
- 2) выбрать направление обхода (НО) в контуре;
- 3) разбить цепь характерными точками, которые разделяют сопротивления и ЭДС в контуре;

4) вычислить потенциалы полученных точек;

5) на оси абсцисс (в выбранном масштабе) отложить сопротивления между характерными точками; начало координат должно соответствовать нулю;

6) на оси ординат в масштабе откладываются потенциалы характерных точек, связанных с конкретными сопротивлениями;

7) полученные точки соединяются прямыми линиями.

Примечание: 1) при совпадении направления обхода с направлением тока на пассивном элементе значение потенциала уменьшается; 2) при совпадении направления обхода с направлением ЭДС значение потенциала увеличивается.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Что является электрической цепью? Какие элементы в нее входят?
2. Что такое активный и пассивный контур? Изобразите их.
3. Приведите определение, физический смысл, формулы первого закона Кирхгофа.
4. Приведите определение, физический смысл, формулы второго закона Кирхгофа (для пассивного и активного контура).
5. Что такое баланс мощностей? Дайте его определение, формулы.

Порядок выполнения лабораторной работы

Опыт 1. Первый закон Кирхгофа

1. Соберите электрическую цепь, согласно рисунку 3.3.
2. Подключите электрическую цепь к постоянному напряжению. Величина исходных значений задается преподавателем (номинальные значения).
3. Выполните измерения электрического тока для всех ветвей схемы. Показания приборов запишите в таблицу 3.1.

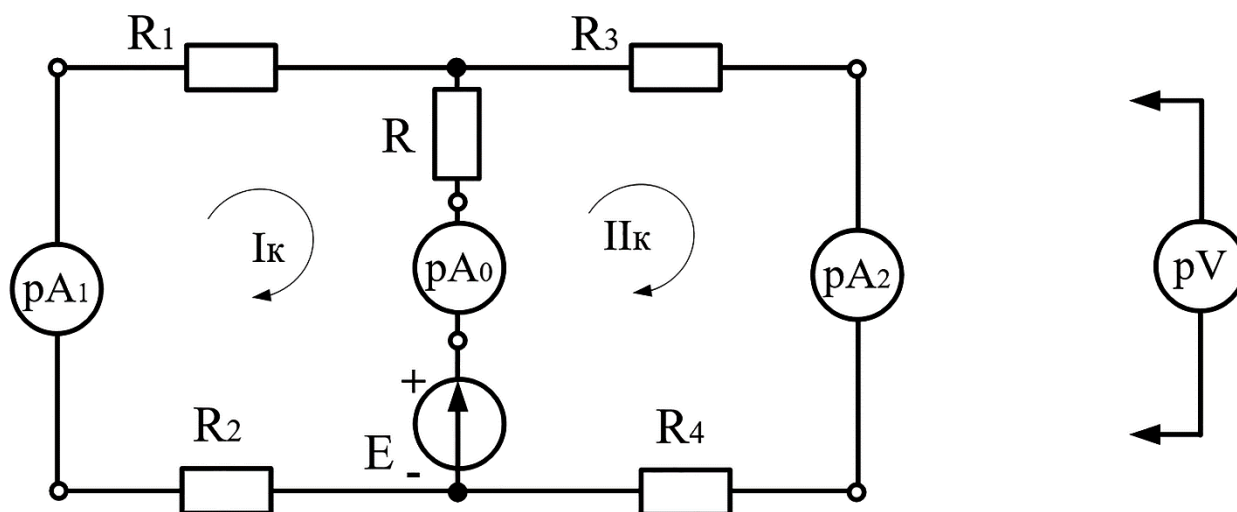


Рисунок 3.3 – Схема экспериментальной цепи для проверки законов Кирхгофа

Таблица 3.1 – Первый закон Кирхгофа

Номер п/п	Номинальные значения					Измерения				Вычисления					
	$R, \text{Ом}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$E, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$R_{12}, \text{Ом}$	$R_{34}, \text{Ом}$	$R_{\text{ЭКВ}}, \text{Ом}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_0, \text{А}$
1															

4. Рассчитайте эквивалентное сопротивление. Вычислите значения токов по закону Ома. Значения запишите в таблицу 3.1.

Формулы для расчета значений таблицы 3.1:

1) сопротивления ветвей: $R_{12} = R_1 + R_2$; $R_{34} = R_3 + R_4$, [Ом];

2) входное (эквивалентное) сопротивление:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R + \frac{R_{12} \cdot R_{34}}{R_{12} + R_{34}}, [\text{Ом}];$$

3) входной (общий) ток:

$$I_0 = \frac{E}{R_{\text{ЭКВ}}}, [\text{А}];$$

4) токи ветвей:

$$I_1 = \frac{E - R \cdot I_0}{R_{12}}; \quad I_2 = \frac{E - R \cdot I_0}{R_{34}}, [\text{А}]$$

5. Проверьте правильность значений эксперимента с помощью определения входного тока по первому закону Кирхгофа: $I_0 = I_1 + I_2, [A]$.

6. Сделайте выводы по опыту 1.

Опыт 2. Второй закон Кирхгофа

1. Подключите электрическую цепь (рис. 3.3) к постоянному напряжению. Величина исходных значений задается преподавателем (номинальные значения). Номинальные значения принимаются, что и в опыте 1.

2. Выполните измерения электрического напряжения для всех элементов схемы и токов ветвей. Показания приборов запишите в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Второй закон Кирхгофа (эксперимент)

Но- мер п/п	Номинальные значения					Измерения											
	$R, \text{ Ом}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_4, \text{ Ом}$	$E, \text{ В}$	$U_R, \text{ В}$	$U_{AR}, \text{ В}$	$U_{R1}, \text{ В}$	$U_{R2}, \text{ В}$	$U_{R3}, \text{ В}$	$U_{R4}, \text{ В}$	$U_{R12}, \text{ В}$	$U_{R34}, \text{ В}$	$I_0, \text{ А}$	$I_1, \text{ А}$	$I_2, \text{ А}$
1																	

3. Сделайте теоретический расчет для изучения второго закона Кирхгофа (табл. 3.3). *Примечание:* исходные значения (ЭДС, сопротивления элементов) для этих расчетов примите из таблицы 3.2. Все остальные табличные значения рассчитываются исходя из номинальных значений (табл. 3.1, 3.2).

Таблица 3.3 – Второй закон Кирхгофа (теоретический расчет)

Вычисления															
Номер п/п	$E,$ В	$R_{12},$ Ом	$R_{34},$ Ом	$R_{\text{ЭКВ}},$ Ом	$I_0,$ А	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$U_R,$ В	$U_{R1},$ В	$U_{R2},$ В	$U_{R3},$ В	$U_{R4},$ В	$U_{R12},$ В	$U_{R34},$ В	
1															

Формулы для расчета значений таблицы 3.3:

1) сопротивления ветвей:

$$R_{12} = R_1 + R_2; R_{34} = R_3 + R_4, [\text{Ом}];$$

2) входное (эквивалентное) сопротивление:

$$R_{\text{экв}} = R + \frac{R_{12} \cdot R_{34}}{R_{12} + R_{34}}, [\text{Ом}];$$

3) входной (общий) ток:

$$I_0 = \frac{E}{R_{\text{экв}}}, [\text{А}];$$

4) токи ветвей:

$$I_1 = \frac{E - R \cdot I_0}{R_{12}}; \quad I_2 = \frac{E - R \cdot I_0}{R_{34}}, [\text{А}];$$

5) напряжения элементов:

$$U_R = I_0 \cdot R; \quad U_{R1} = I_1 \cdot R_1; \quad U_{R2} = I_1 \cdot R_2; \quad U_{R3} = I_2 \cdot R_3; \quad U_{R4} = I_2 \cdot R_4, [\text{В}];$$

6) входное напряжение:

$$U_{R12} = U_{R1} + U_{R2}; \quad U_{R34} = U_{R3} + U_{R4}, \quad U = E - U_R, [\text{В}]$$

4. Проверьте выполнение второго закона Кирхгофа для замкнутых независимых контуров (первого, второго, внешнего), записав уравнения по второму закону Кирхгофа для эксперимента (табл. 3.2) и теоретического расчета (табл. 3.3).

Формулы для проверки второго закона Кирхгофа

1. Для внешнего контура: $0 = I_1 \cdot (R_1 + R_2) - I_2 \cdot (R_3 + R_4)$.

2. Для первого контура: $E = I_1 \cdot (R_1 + R_2) + I_0 \cdot R$.

3. Для второго контура: $E = I_2 \cdot (R_3 + R_4) + I_0 \cdot R$.

5. Определите значения погрешностей по формулам для первого и второго закона Кирхгофа.

Примечание: исходные данные для определения погрешностей примите из таблиц 3.2 и 3.3. Полученные значения запишите в таблицу 3.4.

Формулы расчета для определения погрешностей. Абсолютная погрешность – является оценкой абсолютной ошибки измерения:

$$\Delta X = |X_{\text{изм}} - X_n|$$

Относительная погрешность – погрешность средства измерений, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к опорному значению измеряемой величины:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_{\text{изм}}} \cdot 100\%$$

Таблица 3.4 – Расчет погрешностей

Номер п/п	Абсолютная погрешность					Относительная погрешность				
	Δ_{I_0}	Δ_{I_1}	Δ_{I_2}	$\Delta_{U_{12}}$	$\Delta_{U_{34}}$	γ_{I_0}	γ_{I_1}	γ_{I_2}	$\gamma_{U_{12}}$	$\gamma_{U_{34}}$

Сделайте выводы по расчетам погрешностей.

6. Используя значения таблиц 3.2 и 3.3, проверьте правильность эксперимента с помощью баланса мощностей (лабораторная работа 2). Уравнение баланса мощностей (эксперимент и теоретический расчет) для экспериментальной схемы имеет вид:

$$E \cdot I_0 = I_1^2 \cdot (R_1 + R_2) + I_2^2 \cdot (R_3 + R_4) + I_0^2 \cdot R$$

7. Постройте потенциальную диаграмму для одного замкнутого контура исследуемой электрической цепи с определенной точкой заземления (задается преподавателем), используя данные той таблицы (табл. 3.2 или 3.3), к которой более точно сошлись второй закон Кирхгофа и баланс мощностей.

Примечание: для схемы (рис. 3.4) потенциальная диаграмма строится по следующим расчетам: заземляется точка «2» (потенциал в этой точке равен нулю).

Далее рассчитываются потенциалы в каждой отдельной точке схемы для второго контура:

$$\begin{aligned}\varphi_2 &= 0 [B]; \\ \varphi_3 &= \varphi_2 - I_2 \cdot R_4, [B]; \\ \varphi_4 &= \varphi_3 + E_3, [B]; \\ \varphi_1 &= \varphi_4 - I_0 \cdot R, [B];\end{aligned}$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 - I_2 \cdot R_3 = 0 [B]$$

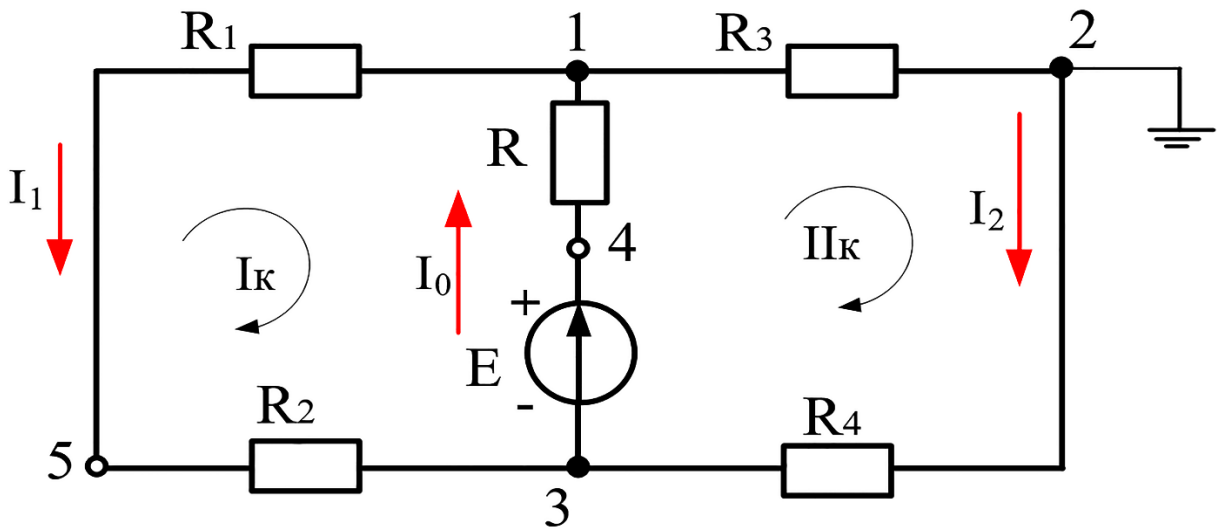


Рисунок 3.4 – Электрическая схема для построения потенциальной диаграммы

По данным расчетам строится потенциальная диаграмма для второго контура исходной схемы (по примеру рисунка 3.5).

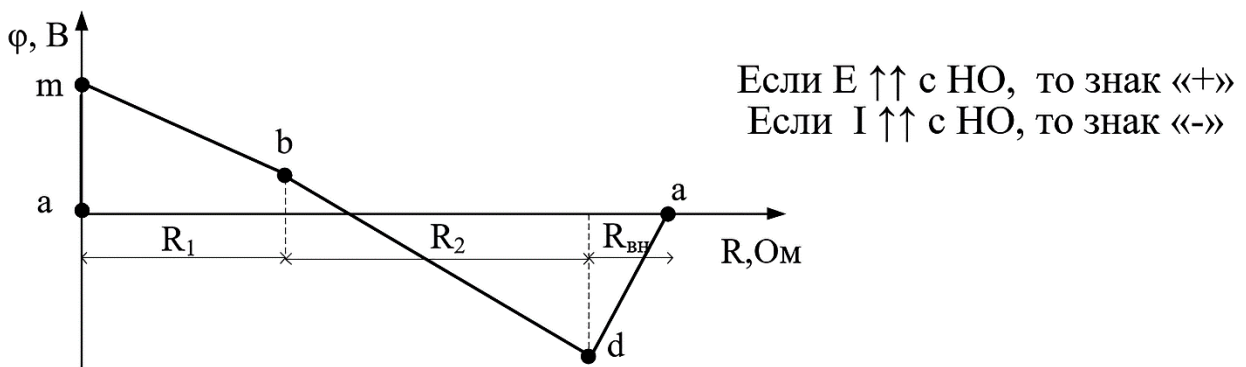


Рисунок 3.5 – Потенциальная диаграмма для контура «ambda»

Сделайте выводы по лабораторной работе в целом.

Контрольные вопросы

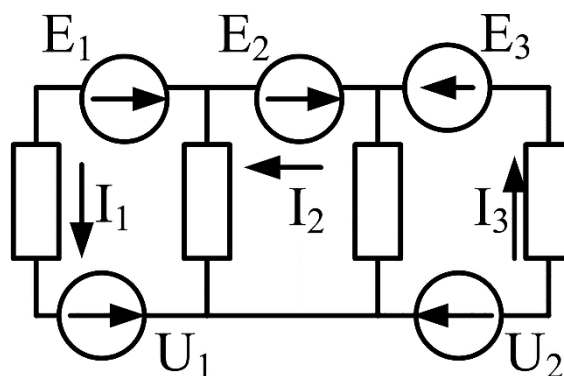
1. Какие величины измеряются в опыте 1? Какие приборы для этого используются?
2. Какие величины измеряются в опыте 2? Какие приборы для этого используются?

3. Какие формулы используются для определения входного сопротивления в опыте 1 и опыте 2? Почему?
4. В чем различия экспериментов для первого и второго закона Кирхгофа? Объясните.
5. Какой закон еще использовался в данной лабораторной работе? Запишите формулу, объясните ее.
6. Проанализируйте таблицу 3.1 для опыта 1. Сравните измеренные величины и расчеты этих величин.
7. Проанализируйте таблицу 3.2 для опыта 2. Сравните измеренные величины и расчеты этих величин.
8. Для чего используется баланс мощностей?
9. Изобразите сложную электрическую схему, запишите для нее уравнение баланса мощностей.
10. Объясните построение потенциальной диаграммы для замкнутого контура.

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЦЕПЯМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Какие из машин с ЭДС E_1, E_2, E_3 и напряжениями U_1, U_2 отдают энергию, а какие потребляют? Укажите неправильный ответ:

- 1) машина с U_1 потребляет;
- 2) машина с E_2 потребляет;
- 3) машина с E_3 отдает;
- 4) машина с E_1 отдает.



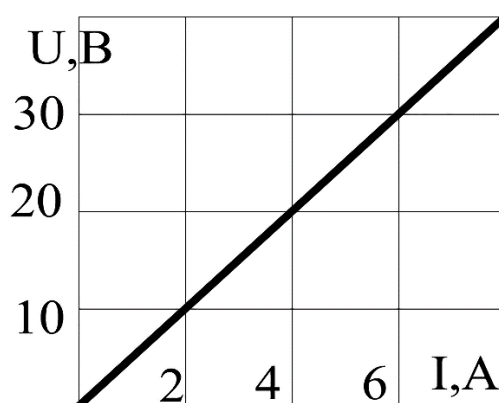
2. Длина и площадь поперечного сечения провода увеличены в три раза.

Как изменилась проводимость провода?

- 1) осталась неизменной;
- 2) уменьшилась в три раза;
- 3) увеличилась в три раза;
- 4) уменьшилась в шесть раз.

3. При заданной вольт-амперной характеристике приемника его проводимость равна:

- 1) 20 См;
- 2) 0,05 См;
- 3) 0,2 См;
- 4) 0,02 См.



4. Электрическая цепь, у которой электрические напряжения и электрические токи связаны друг с другом линейными зависимостями, называется:

- 1) линейной электрической цепью;
- 2) принципиальной схемой;
- 3) схемой замещения;
- 4) нелинейной электрической цепью.

5. Выберите вид соединения элементов, при котором у элементов общее начало и общий конец соединения:

- 1) последовательное;
- 2) параллельное;
- 3) смешанное.

6. Приборы показывают, что к узлу направлены токи 3 А и 8 А, а утекают токи 5 А и 7 А. Сколько ветвей сходится в узле?

- 1) три;
- 2) четыре;

3) пять;

4) не менее пяти.

7. В электрической цепи сопротивления реостатов равны: $R_1 = 20 \text{ Ом}$, $R_2 = 30 \text{ Ом}$; ЭДС источников составляют: $E_1 = 100 \text{ В}$, $E_2 = 50 \text{ В}$.

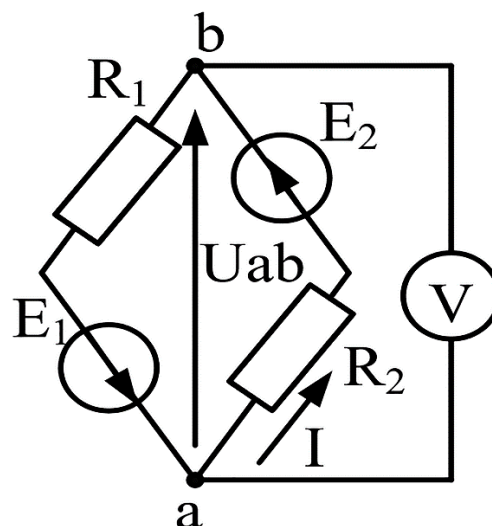
Определите показание вольтметра:

1) 150 В;

2) 50 В;

3) 160 В;

4) 40 В.



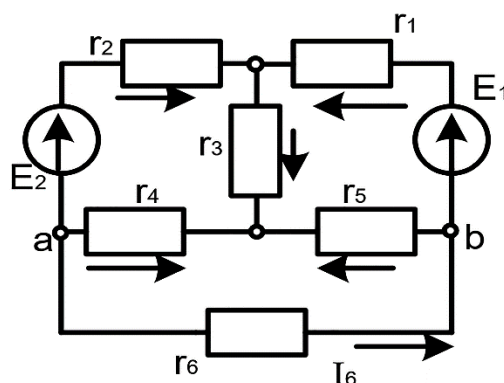
8. Сколько в представленной цепи электрических узлов и ветвей?

1) 3 и 7 соответственно;

2) 4 и 6 соответственно;

3) 4 и 5 соответственно;

4) 4 и 4 соответственно.



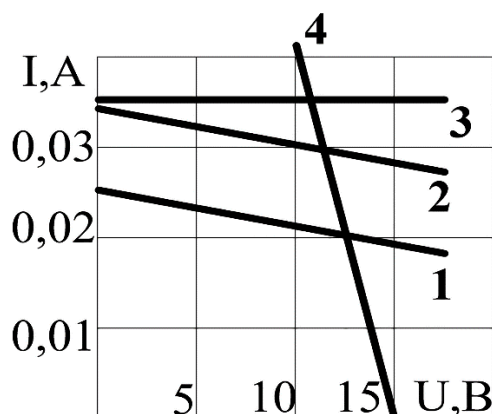
9. Идеальному источнику тока соответствует внешняя характеристика под номером:

1) четыре;

2) два;

3) один;

4) три.



10. Каким прибором измеряют ток на участке цепи?

1) ваттметром; 2) амперметром;

3) вольтметром; 4) омметром.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы: 1) приобрести навыки исследования цепи переменного тока при последовательном соединении элементов; 2) изучить явление резонанса напряжений в цепи переменного тока при последовательном соединении элементов R, L, C .

Общие теоретические сведения

Основными элементами (приемниками) электрической цепи переменного тока являются активное сопротивление (резисторы), индуктивность (катушка индуктивности) и емкость (конденсатор емкости). Все эти элементы можно соединить последовательно (рис. 4.1).

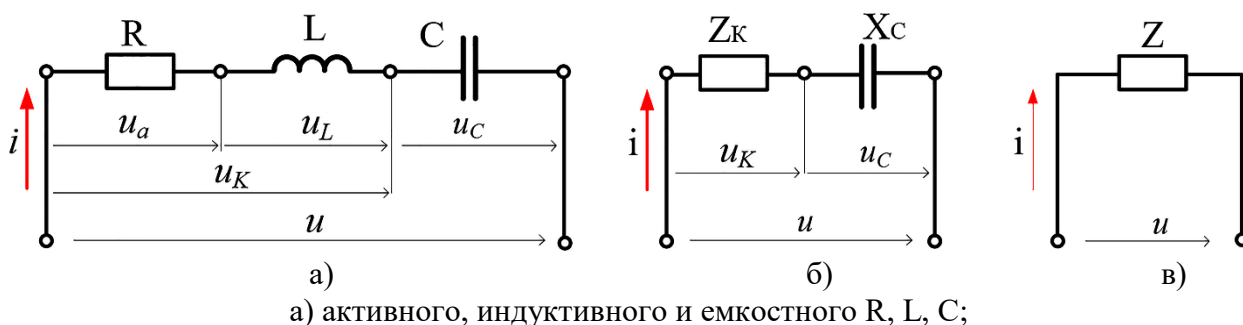


Рисунок 4.1 – Схема цепи последовательного соединения элементов

Реальная катушка индуктивности обладает активным сопротивлением R и индуктивностью L (рис. 4.1, а). Примером может служить катушка двигателя, трансформатора, прибора и т. д.

Любой элемент цепи, обладающий индуктивностью, создает определенное сопротивление при прохождении через него переменного тока. Это можно пояснить тем, что в индуктивном элементе при прохождении переменного

тока происходит возбуждение ЭДС самоиндукции e_L , индукционный ток которой направлен против основного тока. Данное приводит к появлению дополнительного индуктивного сопротивления. Такое индуктивное сопротивление пропорционально частоте тока f и индуктивности цепи L :

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L \quad (4.1)$$

где ω – угловая частота, с^{-1} ; $\omega = 2\pi f$.

При значении промышленной частоты $f = 50$ Гц, угловая частота будет равна: $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}$.

Полное сопротивление реальной катушки индуктивности Z_K (рис. 4.1, б) при переменном токе, состоящее из последовательно соединенных активного R и индуктивного X_L сопротивлений, в комплексной форме выражается формулой (4.2):

$$Z_K = R + j \cdot X_L = Z_K \cdot e^{j\varphi}, \quad (4.2)$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R} \quad (4.3)$$

где Z_K – модуль сопротивления катушки; $Z_K = \sqrt{R^2 + X_L^2}$;
 φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

Конденсатор обладает емкостным сопротивлением. **Емкостное сопротивление** – это сопротивление переменному току, которое оказывает электрическое поле, возникающее вокруг зарядов, накапливаемых на пластинах конденсатора (рис. 4.1, а, б).

Емкостное сопротивление обратно пропорционально угловой частоте тока и емкости цепи C :

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (4.4)$$

Следует отметить, что емкостное сопротивление по существу своего действия противоположно индуктивному сопротивлению, поэтому при определении результирующего реактивного сопротивления X индуктивное сопротивление $X_L > 0$, а емкостное $X_C < 0$, из чего следует:

$$X = X_L - X_C \quad (4.5)$$

Поэтому при последовательном соединении реальной катушки индуктивности и конденсатора емкости (рис. 4.1) полное сопротивление цепи в комплексной форме имеет вид выражения (4.6):

$$\underline{Z} = R + j \cdot X_L - j \cdot X_C = Z \cdot e^{j\varphi}, \quad (4.6)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (4.7)$$

где φ – угол сдвига фаз между напряжением и током; $\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$;

Z – модуль входного (полного) сопротивления цепи.

Формулу (4.7) можно представить в виде выражения (4.8):

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (4.8)$$

По закону Ома, ток в цепи с последовательным соединением реальной катушкой индуктивности и конденсатора (рис. 4.1, а, б, в) находится с использованием формулы (4.9):

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (4.9)$$

При последовательно соединенных элементах (рис. 4.1, б) значение тока является одинаковым для всех элементов.

Модули значений напряжений элементов в схеме (рис. 4.1, а) для каждого элемента определяются следующим образом:

- 1) активная составляющая напряжения (на резисторе): $U_a = R \cdot I$;
- 2) индуктивная составляющая напряжения (на индуктивности): $U_L = X_L \cdot I$;

3) на реальной катушке индуктивности: $U_K = Z_K \cdot I$;

4) емкостное напряжение (на конденсаторе): $U_C = X_C \cdot I$;

5) входное, общее напряжение (всей цепи): $U = Z \cdot I$.

Расчет электрических цепей переменного тока упрощается, если вести его с помощью мгновенных, а также комплексных величин. В этом случае можно использовать законы Ома и Кирхгофа.

Мгновенное значение входного напряжения определяется как сумма мгновенных напряжений каждого элемента:

$$u = u_a + u_L + u_c = u_K + u_c \quad (4.10)$$

где u_a – мгновенное значение напряжения на резисторе;

u_L – мгновенное значение напряжения на индуктивности;

u_K – мгновенное значение напряжения на реальной катушке индуктивности; $u_K = u_a + u_L$;

u_c – мгновенное значение напряжения на конденсаторе емкости.

При последовательном соединении элементов (рис.4.1) угол сдвига фаз между напряжением и током определяется по формуле (4.11), которая включает в себя реактивное и активное сопротивления цепи:

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{\omega \cdot L - 1/\omega \cdot C}{R} \quad (4.11)$$

Значение угла сдвига фаз может быть положительным или отрицательным. Это зависит от соотношения индуктивного и емкостного сопротивления. Если индуктивное сопротивление больше емкостного, то $\varphi > 0$, то есть положительное значение, и наоборот.

Необходимо отметить, что индуктивное X_L и емкостное X_C сопротивления элементов являются реактивными сопротивлениями. Эти две величины связаны с понятием реактивной мощности Q .

Реактивная мощность характеризует энергию обмена между источником и приемником. Следует отметить, что реактивная мощность не преобразуется в другие виды энергии. Для индуктивности – это магнитная энергия, для емкости – электрическая.

Единицей измерения для реактивной мощности Q является вольт-амперы реактивные. Рассчитывается реактивная мощность по формуле (4.12):

$$Q = I^2 \cdot X = I^2 \cdot (X_L - X_C) = I^2 \cdot X_L - I^2 \cdot X_C = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (4.12)$$

Кроме реактивной мощности существует понятие активной мощности. Она связана с сопротивлением резистивного элемента R . Это сопротивление называется активным сопротивлением.

Активная мощность – это энергия обмена между источником и приемником, которая преобразуется в другой вид энергии. Примером активной мощности могут быть следующие элементы:

- 1) в резистивном элементе электрическая энергия преобразуется в тепловую энергию;
- 2) в лампе накаливания – электрическая энергия преобразуется в световую энергию.

Процесс передачи активной энергии необратим. Активная мощность измеряется в ваттах и рассчитывается по формуле (4.13):

$$P = I^2 \cdot R = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (4.13)$$

Величина, связывающая активную и реактивную мощности, называется **полной мощностью цепи S** , измеряется в вольт-амперах и находится по формуле (4.14):

$$S = I^2 \cdot Z = \sqrt{P^2 + Q^2} = U \cdot I \quad (4.14)$$

Из формулы (4.14) можно выразить величину, называемую коэффициентом мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{R}{Z} \quad (4.15)$$

Коэффициент мощности – важный эксплуатационный параметр электрических приемников энергии. Эта величина показывает, какую часть от полной мощности составляет активная мощность. Чем выше $\cos \varphi$, тем при меньшем значении тока в цепи может быть произведено преобразование электроэнергии в другие виды энергии. Это приводит к уменьшению потерь электроэнергии, ее экономии и удешевлению устройств электропередачи.

Необходимо обратить внимание на следующий момент, что при последовательном соединении катушки индуктивности и конденсатора емкости (рис. 4.1) возможен один из **видов нагрузки**:

1) при $X_L > X_C$ ($\varphi > 0$) цепь носит **активно-индуктивный характер**; ток отстает по фазе от входного напряжения на угол $\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$;

2) при $X_L < X_C$ ($\varphi < 0$) цепь носит **активно-емкостный характер**; ток опережает по фазе входное напряжение на угол $\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$;

3) при $X_L = X_C$ возникает резонанс напряжения; цепь носит **активный характер** ($\varphi = 0$).

Анализ цепи значительно упрощается и получает большую наглядность, если использовать построение **векторных диаграмм** (рис. 4.2, а). Результатом построения векторной диаграммы при последовательном соединении элементов является **вектор входного напряжения цепи**.

Вектор суммарного (входного) напряжения цепи получают путем сложения активной, индуктивной и емкостной составляющих напряжения (рис. 4.2, а), что находит отражение в выражении (4.16):

$$\vec{U} = \vec{U}_a + \vec{U}_L + \vec{U}_C = \vec{U}_K + \vec{U}_C \quad (4.16)$$

где $\vec{U}_a$ – вектор активной составляющей напряжения (на резисторе);

$\vec{U}_L$ – вектор индуктивной составляющей напряжения (на индуктивности);

$\vec{U}_K$ – вектор напряжения катушки индуктивности (на реальной катушке индуктивности);

$\vec{U}_C$ – вектор емкостной составляющей напряжения (на емкости).

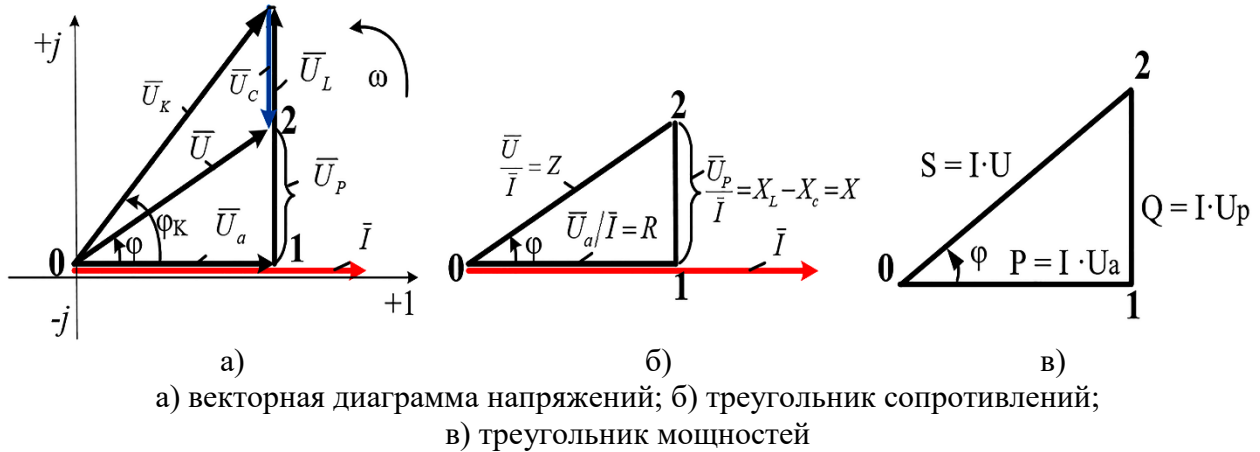


Рисунок 4.2 – Последовательное соединение R, L, C

Векторная диаграмма для цепи при последовательном соединении элементов R, L, C (рис. 4.1) (для условия $X_L > X_C$) строится с учетом следующих правил:

1. Построение начинается с вектора тока, так как ток во всех элементах цепи один и тот же (последовательное соединение).

2. В выбранном масштабе откладывается вектор тока $\vec{I}$, направление которого выбирается произвольно (чаще всего по горизонтальной, действительной оси).

3. Выбирается масштаб для построения векторов напряжений.

4. Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током, поэтому вектор активной составляющей напряжения $\vec{U}_a$ откладывают из начала координат на той же прямой, что и ток.

5. Напряжение на индуктивном элементе опережает ток на 90° градусов, поэтому вектор индуктивной составляющей напряжения $\vec{U}_L$ откладывается к вектору тока под углом $\varphi = 90^\circ$ в сторону опережения (все векторы вращаются против часовой стрелки с угловой частотой ω) из конца вектора активной составляющей напряжения $\vec{U}_a$.

6. Напряжение на катушке $\vec{U}_K$ – сумма векторов напряжений:

$$\vec{U}_a + \vec{U}_L = \vec{U}_K$$

7. Напряжение на емкостном элементе отстает по фазе от тока на 90 градусов, поэтому вектор емкостного напряжения $\vec{U}_C$ откладывается из конца вектора $\vec{U}_L$ под углом $\varphi = 90^\circ$ в сторону отставания от вектора тока.

Как видно из векторной диаграммы (рис. 4.2, а), модуль результирующего напряжения находят из прямоугольного треугольника «012»:

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{U_a^2 + U_P^2} \quad (4.17)$$

На векторной диаграмме треугольник «012» представляется как **треугольник напряжений**.

Если разделить каждую сторону треугольника напряжений «012» на величину входного тока, можно получить **треугольник сопротивлений** (рис. 4.2, б). Катетами треугольника сопротивлений являются активное $R = U_a/I$ и реактивное $X = U_P/I$ сопротивления, а гипотенузой – величина полного (входного) сопротивления $Z = U/I$.

Для построения треугольника мощностей используется треугольник напряжений «012» (рис. 4.2, а). В этом случае каждую сторону треугольника напряжений «012» нужно умножить на значение входного тока – получится **треугольник мощностей** (рис. 4.2, в).

Если в последовательной цепи (рис. 4.1) сделать равными величины сопротивлений $X_L = X_C$, то возникнет явление **резонанс напряжений**.

При этом явлении напряжения реактивных элементов равны $U_L = U_C$. Поэтому, при резонансе напряжений величина полного сопротивления (4.7) становится минимальной, равной только активному сопротивлению цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + 0^2} = R \quad (4.18)$$

Значит, основными условиями резонанса является последовательное соединение R, L, C , а также равенство индуктивного и емкостного сопротивлений $X_L = X_C$. В этом случае ток в цепи становится максимальным, а коэффициент мощности равен единице (4.19):

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R} = I_{max}; \cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{R} = 1 \quad (4.19)$$

Из условия резонанса напряжений видно, что его осуществление может быть выполнено любым из трех способов:

1) подбором величины емкости, исходя из условия резонанса (4.20):

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} \Rightarrow C = \frac{1}{\omega^2 \cdot L} \quad (4.20)$$

2) подбором величины индуктивности:

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} \Rightarrow L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C} \quad (4.21)$$

3) подбором резонансной частоты:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (4.22)$$

4) комбинацией этих трех способов.

Векторная диаграмма для цепи (рис. 4.1, а) при резонансе напряжения представлена на рисунке 4.3.

При резонансе индуктивное напряжение U_L равно емкостному U_C по величине и противоположно по фазе, поэтому реактивное напряжение равно нулю: $U_P = U_L - U_C = 0$, значит общее напряжение при резонансе равно активному: $U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{U_a^2} = U_a$.

Так как при резонансе напряжений происходит непрерывный обмен энергией между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора емкости, то практическое применение этого явления может быть следующим:

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Соберите электрическую цепь, согласно рисунку 4.4.

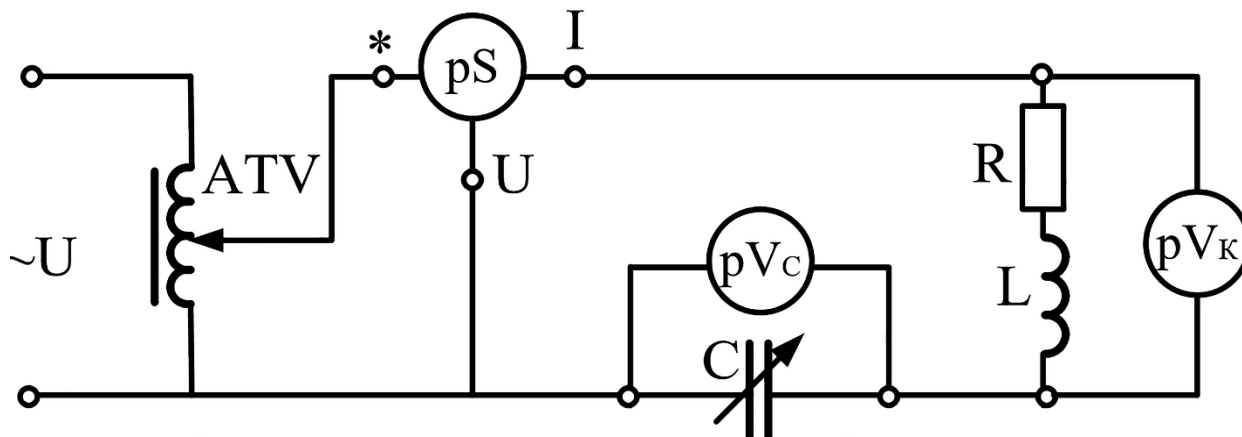


Рисунок 4.4 – Схема экспериментальной цепи для изучения резонанса напряжения в цепи переменного однофазного тока

2. Подключите электрическую цепь к переменному напряжению, которое задает преподаватель (не более 60 В).

3. Изменяя емкость конденсатора (значения задаются преподавателем), запишите показания всех приборов в таблицу 4.1.

4. Произведите расчет величин, указанных в таблице 4.1.

Формулы для расчета значений опыта в таблице 4.1:

1) входное сопротивление цепи:

$$Z = \frac{U}{I}$$

2) полное сопротивление катушки, активная и индуктивная составляющая катушки; индуктивность катушки:

$$Z_K = \frac{U_K}{I}; \quad R = \frac{P}{I^2}; \quad X_L = \sqrt{Z_K^2 - R^2}; \quad L = \frac{X_L}{2\pi \cdot f}$$

3) индуктивное напряжение на катушке: $U_L = X_L \cdot I$;

4) емкостное сопротивление:

$$X_C = \frac{U_C}{I} \quad \text{или} \quad X_C = \frac{10^{-6}}{\omega \cdot C}$$

Таблица 4.1 – Расчетные величины экспериментальных значений

Номер п/п	Измеряемые величины									Вычисления											
	$U, В$	$C, мкФ$	$I, А$	$U_K, В$	$U_C, В$	$P, Вт$	$Q, В \cdot Ар$	$S, В \cdot А$	$\cos\varphi$	$Z, Ом$	$Z_K, Ом$	$R, Ом$	$X_L, Ом$	$L, Гн$	$U_L, В$	$X_C, Ом$	$P, Вт$	$\cos\varphi$	$\varphi, град.$	$Q, В \cdot Ар$	$S, В \cdot А$
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					

5) коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}$$

6) угол сдвига фаз между напряжением и током:

$$\varphi = \arccos \frac{P}{U \cdot I}$$

7) мощности активная, реактивная, полная:

$$P = I^2 \cdot R; Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi; S = U \cdot I$$

5. Сравните значения измеренных и рассчитанных мощностей, а также коэффициент мощности (табл. 4.1).

6. В одной системе координат постройте резонансные кривые – зависимости различных величин от емкости конденсатора:

$$I = f_1(C); Z = f_2(C); U_K = f_3(C); \\ U_L = f_4(C); U_C = f_5(C); \cos \varphi = f_6(C)$$

7. По данным таблицы 4.1, в масштабе постройте векторные диаграммы напряжений, треугольники сопротивлений и мощностей для трех случаев: до резонанса, во время резонанса и после резонанса напряжений.

Указания к построению векторной диаграммы (метод засечек)

1. Так как элементы соединены последовательно (рис. 4.1), то построение начинается одинаковой для всех элементов величины с вектора тока $\vec{I}$. В масштабе, выбранного для тока, строится вектор тока по вещественной оси комплексной плоскости (рис. 4.5).

2. Напряжение на конденсаторе емкости $\vec{U}_C$ всегда отстает от тока на угол $\varphi = 90^\circ$. Поэтому этот вектор строится из начала вектора тока $\vec{I}$ в масштабе для напряжения по мнимой оси.

3. Напряжение на катушке $\vec{U}_K$ состоит из значений активной $\vec{U}_a$ и индуктивной $\vec{U}_L$ составляющей напряжения, поэтому построение следующее. Из

начала вектора $\vec{U}_C$ циркулем строится дуга окружности вектора входного напряжения $\vec{U}$ (в масштабе для напряжения), а из конца вектора $\vec{U}_C$ дуга окружности вектора напряжения на катушке $\vec{U}_K$. В точке пересечения дуг окружностей сходятся векторы $\vec{U}$ и $\vec{U}_K$.

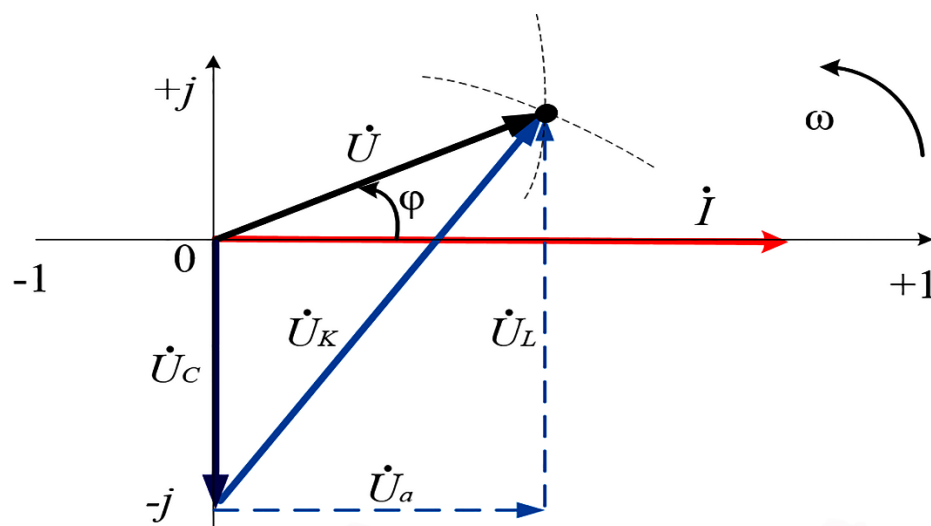


Рисунок 4.5 – Построение векторной диаграммы напряжений методом засечек

Сделайте выводы по лабораторной работе. Определите емкость конденсатора, при которой наступает явление резонанса напряжений.

Контрольные вопросы

1. Какое условие должно выполняться в цепи с последовательным соединением R, L, C , чтобы возник резонанс?
2. Чему равно входное значение тока при последовательном соединении элементов R, L, C ? Почему?
3. Чему равно входное значение тока при последовательном соединении элементов R, L, C в момент резонанса напряжений? Почему?
4. Чему равно входное значение сопротивления? Чему равно это же значение при резонансе? Почему?

5. Почему при резонансе напряжения реактивная составляющая мощности равна нулю? Докажите.
6. Какова особенность резонанса напряжения с энергетической стороны?
7. Почему напряжение на реальной катушке индуктивности при резонансе не равно напряжению на зажимах конденсатора?
8. К каким нежелательным явлениям может привести резонанс? Почему?
9. Почему значение тока сначала увеличивается, а затем уменьшается при выполнении эксперимента?
10. Поясните построение векторных диаграмм в лабораторной работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5.

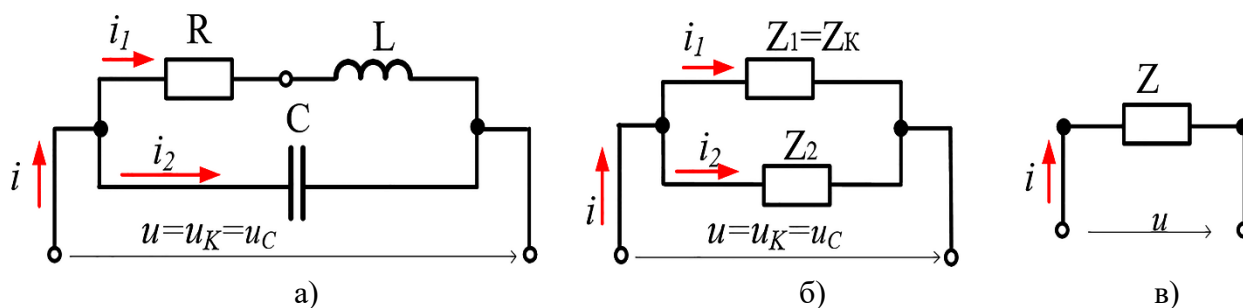
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. РЕЗОНАНС ТОКОВ

Цель работы: 1) приобрести навыки исследования цепи переменного тока с параллельным соединением элементов; 2) изучить явление резонанса тока в цепи переменного тока при параллельном соединении элементов R, L, C .

Общие теоретические сведения

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из параллельного соединения реальной катушки индуктивности и конденсатора переменной емкости.

Схема такой цепи представлена на рисунке 5.1. Полные сопротивления параллельных ветвей определяются с учетом активной R и реактивной X составляющей сопротивлений.



а) реальная катушка индуктивности и конденсаторов емкости RL и C ;

б) преобразование RL и C ; в) входное (эквивалентное) сопротивление

Рисунок 5.1 – Схема цепи параллельного соединения элементов

Сопротивление первой ветви (реальная катушка индуктивности) в комплексной форме представлено выражением (5.1):

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_K = R + jX_L = \underline{Z}_1 \cdot e^{j\varphi} \quad (5.1)$$

где $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_K$ – модуль сопротивления первой ветви, $\underline{Z}_1 = \sqrt{R^2 + X_L^2}$;
 φ – угол сдвига фаз между напряжением и током; $\varphi = \arctg \frac{X_L}{R}$.

Сопротивление второй ветви (конденсатор емкости) в комплексной форме представлено выражением (5.2):

$$\underline{Z}_2 = -jX_C = X_C \cdot e^{-j90^\circ} \quad (5.2)$$

где X_C – сопротивление второй ветви; $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$.

В схеме с параллельным соединением реальной катушки индуктивности и конденсатора емкости (рис. 5.1) входное напряжение U является общим (одинаковым) для параллельных ветвей, то есть $U = U_K = U_C$.

Токи при параллельном соединении элементов различны. В схеме рисунка 5.1 есть общий ток I и токи разветвления $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$.

В параллельных ветвях токи в цепи рассчитываются по закону Ома в комплексной форме (5.3):

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1} = \frac{\dot{U}_K}{\underline{Z}_K}; \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2} = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_2} \quad (5.3)$$

Эти токи будут сдвинуты по отношению к входному (общему) напряжению U на углы φ_1 и φ_2 соответственно. Чтобы определить данные углы нужно знать величину коэффициента мощности (5.4):

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (5.4)$$

где R – активное сопротивление ветви (во второй ветви (рис. 5.1) активного сопротивления нет);

X – реактивное сопротивление ветви (первая ветвь – индуктивность X_L ; вторая ветвь – емкость X_C).

Углы сдвига фаз между входным напряжением и токами ветвей определяются по формуле (5.5):

$$\varphi = \arccos \varphi \quad (5.5)$$

Так как в цепи (рис. 5.1) активное сопротивление второй ветви R равно нулю, то угол сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = 90^\circ$, причем ток на емкости опережает напряжение на этом же элементе.

Входной ток цепи (рис. 5.1) определяется по первому закону Кирхгофа в комплексной форме (5.6):

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad (5.6)$$

Схема, представленная на рисунке 5.1, может иметь разные соотношения и виды нагрузок:

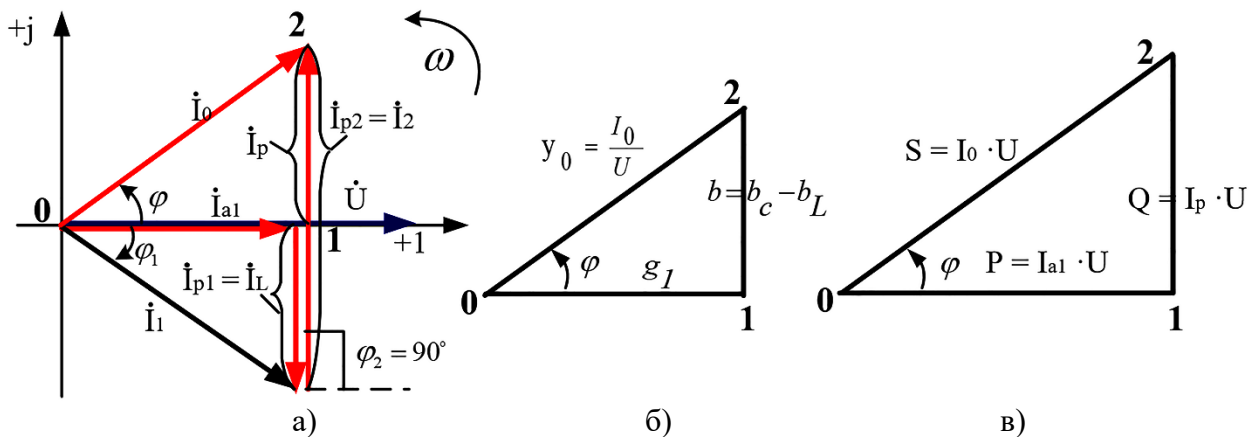
а) если $b_L > b_C$, то цепь носит **активно-индуктивный характер**, а сама реактивная проводимость индуктивный характер, значит $I_L > I_C$, поэтому входное напряжение цепи опережает общий ток I_0 на угол $\varphi > 0$; $\varphi = \arctg \frac{b}{g}$;

б) если $b_L < b_C$, то цепь носит **активно-емкостный характер**, а сама реактивная проводимость емкостный характер, так как $I_L < I_C$, поэтому входное напряжение цепи отстает от общего тока I_0 на угол $\varphi < 0$; $\varphi = \arctg \frac{b}{g}$;

в) при $b_L = b_C$ ($\varphi = 0$) характер цепи **чисто активный**, значит $I_L = I_C$, поэтому входное напряжение цепи совпадает с общим током I_0 ; угол $\varphi = 0$; общий ток равен по величине активной составляющей тока; в цепи наступает явление **резонанса токов**.

Анализ такой цепи удобно проводить с использованием векторных диаграмм. Векторную диаграмму (рис. 5.2, а) для цепи параллельного соединения элементов (рис. 5.1) строят следующим образом:

1. В качестве исходного вектора при параллельном соединении берут вектор входного напряжения $\vec{U}$ (напряжение одинаково на всех элементах). Напряжение строится из начала координат по вещественной оси комплексной плоскости ($\varphi = 0$).



а) векторная диаграмма токов; б) треугольник проводимостей; в) треугольник мощностей
Рисунок 5.2 – Параллельное соединение RL и C при условии $b_L < b_C$

2. Построение тока первой ветви (реальная катушка индуктивности содержит активное сопротивление R и индуктивность L) производится следующим образом: из начала вектора U под углом φ_1 откладывается вектор действующего значения тока реальной катушки $\vec{I}_1$ в сторону отставания (по часовой стрелке).

3. Построение тока второй ветви (емкость – содержит конденсатор): из конца вектора $\vec{I}_1$ под углом $\varphi_2 = 90^\circ$ откладывается вектор действующего значения тока $\vec{I}_2$ в сторону опережения (против часовой стрелки).

4. Суммируя два вектора тока $\vec{I}_1$ и $\vec{I}_2$ (соединяют начало вектора $\vec{I}_1$ и конец вектора $\vec{I}_2$), получают вектор результирующего (входного) тока цепи:

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 \quad (5.7)$$

Из векторной диаграммы видно, что составляющие токов в ветвях будут равны соответственно: на активном элементе R – активный ток (первая ветвь): $I_{a1} = I_1 \cdot \cos \varphi$; на реактивных элементах – катушка индуктивности L (первая ветвь) и конденсатор емкости C (вторая ветвь) – реактивный ток:

$$I_{p1} = I_1 \cdot \sin \varphi_1; \quad I_{p2} = I_2 \cdot \sin \varphi_2 \quad (5.8)$$

Результирующий (общий, входной) ток цепи составит:

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} \quad (5.9)$$

где I_p – реактивный ток цепи ($I_p = I_{p1} - I_{p2} = I_L - I_C$).

Векторная диаграмма (рис. 5.2, а) цепи параллельного соединения элементов (рис. 5.1) содержит треугольник токов «012» (активный I_{a1} , реактивный I_p и общий I_0 токи).

Формула общего сопротивления всех параллельных ветвей (рис. 5.1, а, в) имеет вид выражения (5.10):

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_1}{Z^2}\right)^2 + \left(\frac{X}{Z^2}\right)^2}} \quad (5.10)$$

При расчете параллельного соединения элементов чаще пользуются понятием проводимости. Поэтому в формуле (5.10) можно сделать замену и тогда она будет иметь вид выражения (5.11):

$$Z = \frac{1}{\sqrt{g^2 + b^2}} = \frac{1}{\sqrt{g_1^2 + (b_1 - b_2)^2}} = \frac{1}{y_0} \quad (5.11)$$

где g – активная проводимость цепи; $g = R/Z^2$, См;
 b – реактивная проводимость цепи, $b = X/Z^2$, См;
 b_1 – индуктивная проводимость, См;
 b_2 – емкостная проводимость, См;
 y_0 – полная проводимость всей цепи, См.

Проводимость – это величина, обратная величине сопротивления, поэтому расчет проводимостей может осуществляться по формулам (5.12) (активная, индуктивная, емкостная проводимости):

$$g = \frac{1}{R}; \quad b_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega \cdot L}; \quad b_C = \frac{1}{X_C} = \omega \cdot C \quad (5.12)$$

Если необходимо построить треугольник проводимостей, то его можно получить с помощью треугольника токов (рис. 5.2, а). В этом случае *каждую сторону треугольника токов «012» (активный I_{a1} , реактивный I_p и общий I_0*

токи) нужно разделить на значение входного напряжения – получится **треугольник проводимостей**, представленный на рисунке 5.2, б.

При построении треугольника мощностей используется треугольник токов (рис. 5.2, а). В этом случае *каждую сторону треугольника токов «012» (активный I_{a1} , реактивный I_p и общий I_0 токи) нужно умножить на значение входного напряжения – получится **треугольник мощностей** (рис. 5.2, в).*

Основным условием резонанса токов является равенство реактивных проводимостей $b_1 = b_2$ или равенство отношений (при параллельном соединении R, L, C) (5.13):

$$\frac{X_1}{Z_1^2} = \frac{X_2}{Z_2^2} \quad (5.13)$$

При резонансе ток в неразветвленной части цепи ограничен только активной проводимостью (так как $b_L - b_C = 0$) и принимает минимальное значение ($I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{I_a^2} = I_a$, так как $I_p = I_L - I_C = 0$).

То есть значение входного тока при резонансе тока можно представить формулой (5.14):

$$I_0 = U \cdot \sqrt{g_1^2 + (b_1 - b_2)^2} = U \cdot g_1 \quad (5.14)$$

При явлении резонанса токов реактивные токи в ветвях рассчитываются с использованием зависимостей: $I_{p1} = b_1 \cdot U$ и $I_{p2} = b_2 \cdot U$. Они равны по величине и находятся в противофазе, то есть противоположны по направлению (рис. 5.3).

Стоит отметить, что полная мощность будет равна активной, так как реактивная мощность катушки компенсирует реактивную мощность конденсатора (то есть $S = P$, так как $Q = Q_L - Q_C = 0$).

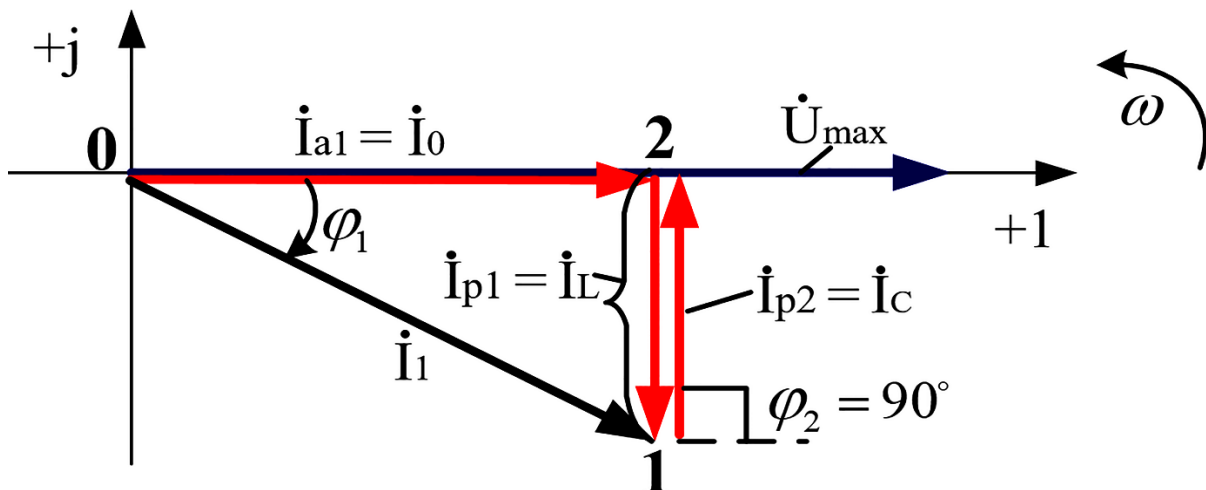


Рисунок 5.3 – Векторная диаграмма токов при условии резонанса тока ($b_L = b_C$)

Из приведенных формул видно, что резонанс токов может быть осуществлен одним из четырех способов: 1) изменением емкости C ; 2) изменением индуктивности L ; 3) изменением угловой частоты $\omega = 2\pi f$; 4) изменением активных сопротивлений R .

Однако по своим свойствам резонанс токов во многом противоположен резонансу напряжений. В этом случае на катушке и на конденсаторе напряжение такое же, как у генератора.

При резонансе сопротивление контура между точками разветвления становится максимальным, а ток генератора будет минимальным.

Полное (эквивалентное) сопротивление контура для генератора при резонансе токов $R_{0Э}$ можно подсчитать по формуле (5.15):

$$R_{0Э} = \frac{L}{R \cdot C} \quad (5.15)$$

Сопротивление $R_{0Э}$, называемое резонансным сопротивлением, является чисто активным. Поэтому при резонансе токов нет сдвига фаз между напряжением генератора и его током.

При резонансе токов ток на индуктивности I_L равен емкостному току I_C по величине $I_L = I_C$ и противоположен по фазе. Следовательно, реактивный

ток равен нулю ($I_P = I_L - I_C = 0$), отсюда общее значение тока при резонансе равно активному току: $I = \sqrt{I_a^2 + (I_L - I_C)^2} = \sqrt{I_a^2} = I_a$.

Так как при резонансе токов происходит непрерывный обмен энергией между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора емкости, **практическое применение этого явления может быть следующим:**

- 1) явление используется в полосно-заграждающих фильтрах;
- 2) используется в радиоприемниках для выделения сигнала конкретной радиостанции;
- 3) колебательный контур, работающий в режиме резонанса токов, является одним из основных узлов электронных генераторов.

Однако, следует отметить, что при резонансе токов могут возникнуть опасно большие значения токов на индуктивности I_L и емкости I_C , если величины b_L и b_C много больше, чем величина R . Это может привести к аварийным ситуациям в электрической цепи.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Что такое параллельное соединение элементов? Изобразите его.
2. Дайте определение индуктивного сопротивления. Запишите формулу.
3. Какие условия необходимо выполнить для того, чтобы в цепи возник резонанс токов?
4. Что такое коэффициент мощности? Как он рассчитывается?
5. Какие приборы используются в данной лабораторной работе, каким образом и для чего?

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Соберите схему, приведенную на рисунке 5.4.

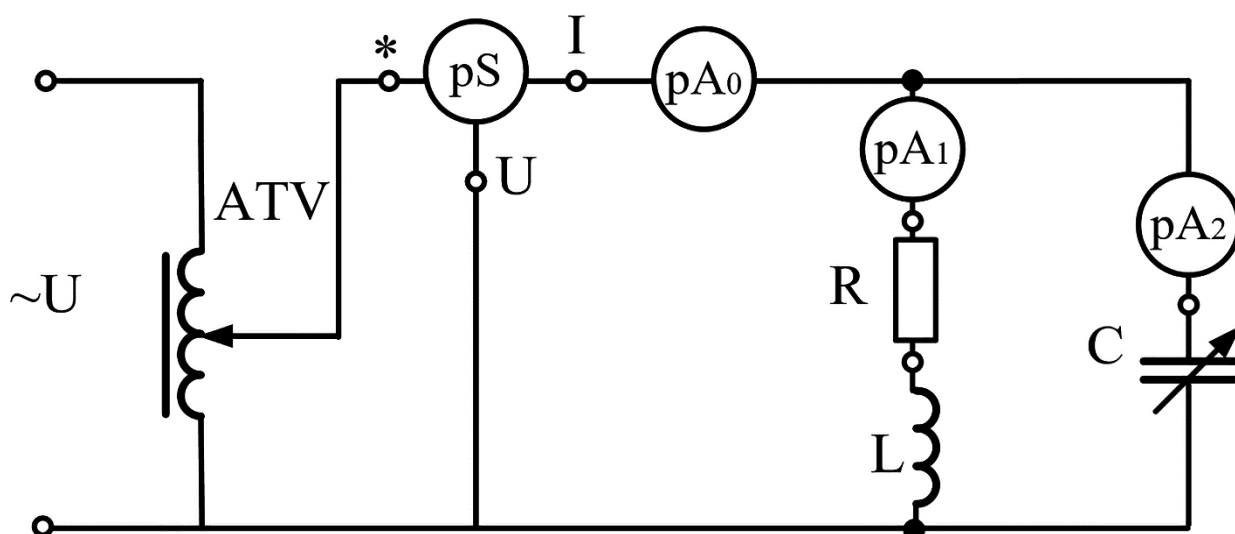


Рисунок 5.4 – Схема экспериментальной цепи для изучения резонанса тока в цепи переменного однофазного тока

2. При выключенном конденсаторе включите цепь в сеть на переменное напряжение (не более 220 В, значение задается преподавателем). Запишите показания всех приборов в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Расчетные величины экспериментальных значений

Но- мер п/п	Измеряемые величины						Вычисления										
	$U, В$	$C, мкФ$	$I_0, А$	$I_1 = I_K, А$	$I_2 = I_C, А$	$P, Вт$	$\cos \varphi$	$\varphi, град.$	$y, 10^{-3} См$	$g, 10^{-3} См$	$b, 10^{-3} См$	$b_C, 10^{-3} См$	$y_K, 10^{-3} См$	$b_L, 10^{-3} См$	$P, Вт$	$Q, вар$	$S, ВА$
1																	
...																	
10																	

3. Изменяя значения емкости на конденсаторе (не менее 10 измерений), запишите показания всех приборов в таблицу 5.1.

Формулы для расчета значений опыта и записи данных в таблицу 5.1:

1) коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}$$

2) угол сдвига фаз между напряжением и током на входе:

$$\varphi = \arccos \frac{P}{U \cdot I}$$

3) полная проводимость цепи:

$$y = \frac{I_0}{U}$$

при этом активная проводимость цепи: $g = y \cdot \cos \varphi$; реактивная проводимость цепи: $b = y \cdot \sin \varphi$; емкостная проводимость цепи: $b_C = \omega \cdot C = 2\pi f \cdot C$.

4) полная проводимость катушки, реактивная проводимость катушки:

$$y_K = \frac{I_K}{U}; b_L = \sqrt{y_K^2 - g^2}$$

5) мощности реактивная и полная:

$$Q = \frac{I_0^2}{b}; S = \sqrt{P^2 + Q^2};$$

4. По данным таблицы 5.1 (в одной системе координат), постройте резонансные кривые – зависимости различных величин от емкости конденсатора:

$$I_0 = f_1(C); I_1 = f_2(C); I_2 = f_3(C); \\ U = f_4(C); \cos \varphi = f_6(C); y = f_5(C).$$

5. По данным таблицы 5.1 (в масштабе), постройте векторные диаграммы, треугольники проводимостей и треугольники мощностей для трех случаев: до резонанса тока; во время резонанса; после резонанса.

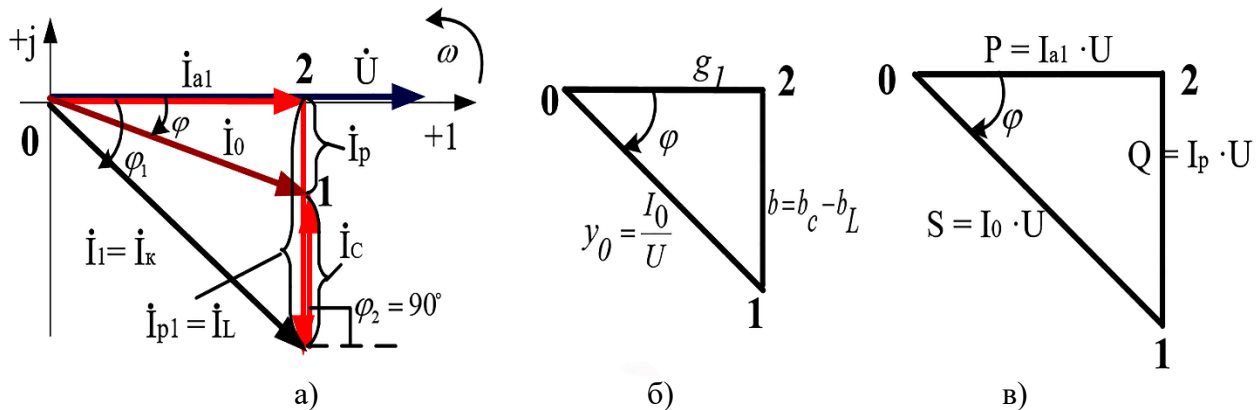
Указания к построению векторной диаграммы токов

1. Построение начинается с вектора напряжения $\vec{U}$ (соединение параллельное (рис. 5.4)). В масштабе строится вектор напряжения $\vec{U}$ по вещественной оси комплексной плоскости (рис. 5.5).

2. Рассчитываются значение угла φ_1 на катушке индуктивности, активная I_{a1} и реактивная I_L составляющая тока на катушке:

$$\varphi_1 = \arccos \frac{P}{U \cdot I_1}; I_{a1} = I_1 \cdot \cos \varphi_1; I_L = I_1 \cdot \sin \varphi_1$$

Так как катушка в эксперименте одна и та же, то эти значения для всех опытов не изменяются и строятся одинаково.



а) векторная диаграмма токов; б) треугольник проводимостей; в) треугольник мощностей
Рисунок 5.5 – Параллельное соединение RL и C при условии $b_L > b_C$

3. Под углом φ_1 , рассчитанным ранее, к входному напряжению откладывается вектор действующего значения тока катушки индуктивности $\vec{I}_K = \vec{I}_1$ в сторону отставания.

4. Далее из конца вектора $\vec{I}_K$ строится перпендикуляр, который доходит до вещественной оси, то есть вектора входного напряжения. В точке пересечения с осью сходятся два вектора $\vec{I}_{a1}$ и $\vec{I}_L$: 1) из начала вектора $\vec{I}_K$ в масштабе для тока по вещественной оси (совпадает с вектором U) вектор активной составляющей тока $\vec{I}_{a1}$; 2) вектор реактивной составляющей тока $\vec{I}_L$ направлен вниз (отстает от вектора входного напряжения на $\varphi = 90^\circ$) до пересечения с вектором $\vec{I}_K$ (рис. 5.5, а).

5. На конденсаторе емкости вектор тока $\vec{I}_C$ всегда опережает напряжение на $\varphi = 90^\circ$. Поэтому этот вектор строится из конца вектора тока катушки $\vec{I}_K$ в масштабе для тока под углом 90 градусов относительно вещественной оси.

7. Соединяя начало построения (начало вектора $\vec{I}_K$) с концом построения (конец вектора $\vec{I}_C$), то есть суммируя эти два вектора, получают вектор входного тока $\vec{I}_0$.

Такое построение основано на первом законе Кирхгофа $\vec{I}_0 = \vec{I}_K + \vec{I}_C$.

Указания к построению треугольников проводимостей

Построение треугольника проводимости выполняется с использованием треугольника токов (рис. 5.2, а). Каждую сторону треугольника токов «012» (активный I_{a1} , реактивный I_p и общий I_0 токи) нужно разделить на значение входного напряжения. Далее выбирается масштаб для проводимости. Построенный треугольник проводимости должен быть похож на треугольник токов (угол φ должен быть таким же).

Сделайте выводы по работе. Определите емкость конденсатора, при которой наступает явление резонанса токов.

Контрольные вопросы

1. Какое условие должно выполняться в цепи с параллельным соединением R, L, C , чтобы возник резонанс?
2. Чему равно входное значение тока при параллельном соединении элементов R, L, C в момент резонанса тока? Почему?
3. Чему равно значение полной проводимости при резонансе токов? Почему?
4. Почему при резонансе токов реактивная составляющая мощности равна нулю? Докажите.
5. Какова особенность резонанса токов с энергетической стороны?
6. Чему равен входной ток на реальной катушке индуктивности при резонансе тока? Почему?
7. К каким нежелательным явлениям может привести резонанс тока? Почему?
8. Поясните построение векторных диаграмм в работе.
9. Изменением каких величин можно добиться резонанса токов?
10. Объясните условия возможности двух резонансов, одного резонанса и невозможности резонанса в электрической цепи.

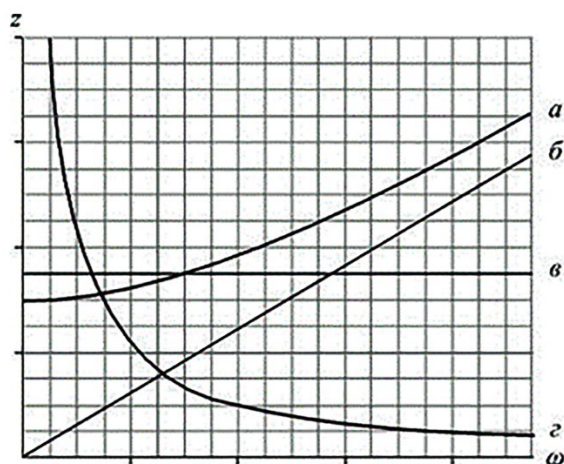
ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЦЕПЯМ

ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Угол сдвига фаз между током и напряжением участка цепи определяют:

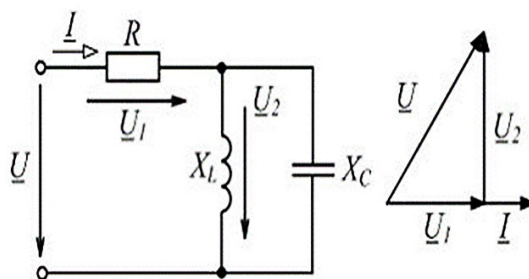
- 1) вычитанием начальной фазы тока из начальной фазы напряжения;
- 2) вычитанием начальной фазы напряжения из начальной фазы тока;
- 3) сложением начальных фаз напряжения и тока.

2. На рисунке изображены зависимости полных сопротивлений от угловой частоты. Зависимость б) соответствует следующему элементу:



- 1) идеальному индуктивному L ;
- 2) идеальному емкостному C ;
- 3) идеальному резистивному R .

3. На рисунке приведены схема и векторная диаграмма цепи со смешанным соединением элементов. Векторная диаграмма соответствует условию:



- 1) $X_L < X_C$; 2) $X_C = 0$;
- 3) $X_L = X_C$; 4) $X_L > X_C$.

4. Чему равно значение активной мощности в цепи однофазного переменного тока?

- 1) $P = S - Q$;
- 2) $P = U \cdot I \cdot \sin \varphi$;
- 3) $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$;

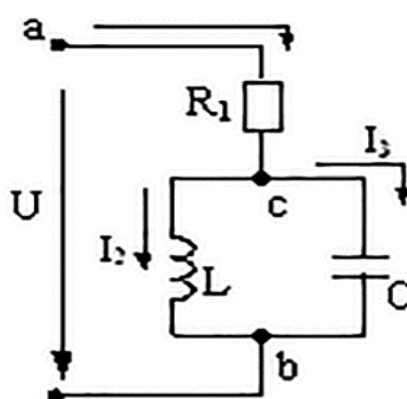
4) $P = \sqrt{S - Q}$.

5. Реальная катушка индуктивности с параметрами R и L подключена к источнику синусоидального напряжения: $u = U_m \sin \omega t$. Для увеличения угла сдвига фаз между напряжением и током катушки необходимо уменьшить:

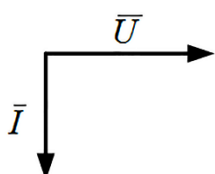
- 1) активное сопротивление R ;
- 2) индуктивность L ;
- 3) угловую частоту ω .

6. Возможно ли явление резонанса для данной схемы? Какой именно резонанс возможен?

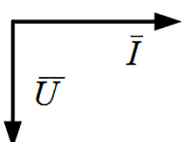
- 1) невозможен;
- 2) да, любой вид резонанса;
- 3) только резонанс токов;
- 4) только резонанс напряжений.



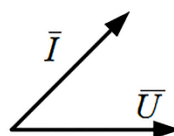
7. Укажите векторную диаграмму для цепи переменного тока с индуктивностью:



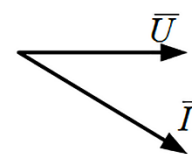
1)



2)



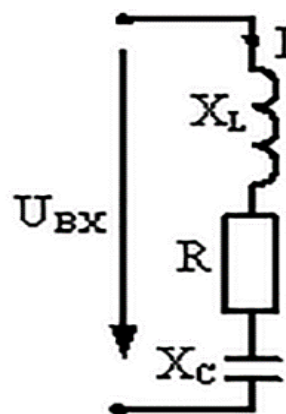
3)



4)

8. Возможно ли явление резонанса для данной схемы? Если да, назовите, какой резонанс возможен?

- 1) невозможен;
- 2) да, любой вид резонанса;
- 3) только резонанс токов;
- 4) только резонанс напряжений.



9. Чему равно значение полной мощности в цепи однофазного переменного тока при явлении резонанса тока?

1) $S = 0$; 2) $S = 1$;

3) $S = P$; 4) $S = Q$.

10. Выберите правильную формулу для определения резонансной частоты:

1) $f_{\text{рез}} = \frac{1}{C \cdot L}$; 2) $f_{\text{рез}} = \frac{1}{2 \cdot C \cdot L}$;

3) $f_{\text{рез}} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{C \cdot L}}$; 4) $f_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
СО ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Цель работы: *приобрести навыки исследования электрических цепей, содержащих индуктивно связанные обмотки.*

Общие теоретические сведения

Электрические цепи могут содержать элементы, индуктивно связанные друг с другом. Такие элементы могут связывать цепи, электрически (гальванически) разделенные друг от друга.

Индуктивно связанные цепи – это цепи, в которых магнитные потоки, наводимые токами одной катушки, сцепляются с витками другой катушки. Для возникновения такого эффекта необходимо, чтобы катушки располагались близко друг к другу. Обычно катушки располагают на одном сердечнике или каркасе.

Явлением взаимной индукции называется наведение ЭДС в электрической цепи при изменении потокосцепления взаимной индукции, обусловленного током в другой электрической цепи.

Цепи, в которых наводятся ЭДС взаимной индукции, называются **индуктивно связанными цепями**.

Реальная катушка индуктивности без ферромагнитного сердечника обычно бывает представлена схемой замещения с последовательным соединением идеальной индуктивности и активного сопротивления. Если последнее измерить омметром, то остальные параметры можно определить по показаниям амперметра и вольтметра с помощью формул (6.1):

$$Z = \frac{U}{I}; X = \sqrt{Z^2 - R^2}; L = \frac{X}{\omega} \quad (6.1)$$

При последовательном соединении катушек полное сопротивление цепи находится по формуле (6.2):

$$Z = \sqrt{R_3^2 + X_3^2}, \quad (6.2)$$
$$R_3 = R_1 + R_2; \quad X_3 = X_1 + X_2$$

Если ток i_1 создает в одной из катушек с числом витков w_1 магнитный поток Φ_{11} , и часть этого потока Φ_{21} пронизывает другую катушку с числом витков w_2 , то говорят, что катушки индуктивно связаны между собой.

Может быть и наоборот: часть Φ_{12} потока второй катушки Φ_{22} , созданного током в ней i_2 , пронизывает первую. Эти потоки Φ_{21} , Φ_{12} называются **потоками взаимной индукции**, полные потоки Φ_{11} , Φ_{22} – **потоками самоиндукции**. Потокосцепления этих потоков с соответствующими катушками определяются зависимостями (6.3):

$$\psi_{11} = w_1 \Phi_{11}; \quad \psi_{22} = w_2 \Phi_{22}; \quad \psi_{12} = w_1 \Phi_{12}; \quad \psi_{21} = w_2 \Phi_{21} \quad (6.3)$$

Собственные индуктивности определяются выражениями (6.4):

$$L_1 = \left. \frac{\psi_{11}}{i_1} \right|_{i_2=0}; \quad L_2 = \left. \frac{\psi_{22}}{i_2} \right|_{i_1=0} \quad (6.4)$$

Взаимные индуктивности устанавливаются выражениями (6.5):

$$M_{21} = \left. \frac{\psi_{21}}{i_1} \right|_{i_2=0}; \quad M_{12} = \left. \frac{\psi_{12}}{i_2} \right|_{i_1=0} \quad (6.5)$$

В линейной цепи справедлив принцип взаимности: $M_{12} = M_{21} = M$.

Величина M является общим параметром взаимосвязанных цепей и не зависит от величин потокосцеплений и токов, а определяется только конструкцией катушек, их взаимным расположением и магнитными свойствами окружающей среды.

Придвигая катушки друг к другу, мы увеличиваем M , а, отодвигая их друг от друга – уменьшаем.

Наибольшей взаимной индуктивностью обладают две катушки, навитые одинаково друг на друга, а наименьшей – расположенные своими осями под углом 90 градусов друг к другу или далеко удаленные друг от друга.

При одновременном протекании токов в обеих катушках в соответствии с принципом наложения имеем распределение их магнитных потоков. Здесь в каждой из катушек индуцируются одновременно две ЭДС: ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции. Поэтому напряжения u_1 и u_2 каждой индуктивно связанной катушки имеют две составляющие: одна из них (u_L) вызвана действием ЭДС самоиндукции, а другая (u_M) вызвана действием ЭДС взаимной индукции.

*Направление магнитного потока связано с направлением создающего его тока **правилом «буравчика» (правоходового винта).***

Чтобы учесть ориентацию потоков само- и взаимной индукции в одной катушке, вводится понятие **одноименных зажимов**. *Зажимы, принадлежащие разным катушкам, называются одноименными и обозначаются на схеме одинаковыми символами (точками, звездочками), если при одинаковой ориентации токов по отношению к этим зажимам потоки само- и взаимной индукции складываются.*

Напряжения на индуктивно связанных элементах определяются по закону электромагнитной индукции и их также можно представить в виде суммы составляющих само- и взаимной индукции:

$$u_1 = u_{1L} + u_{1M} = \frac{d\psi_{11}}{dt} \pm \frac{d\psi_{12}}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt},$$
$$u_2 = u_{2L} + u_{2M} = \frac{d\psi_{22}}{dt} \pm \frac{d\psi_{21}}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt}$$

В этих выражениях знак «плюс» соответствует одинаковой ориентации токов по отношению к одноименным зажимам – это будет *согласное включение*; знак «минус» – различная ориентация (*встречное включение*).

На рисунке 6.1 представлены схематические обозначения индуктивно связанных катушек с взаимной индуктивностью.

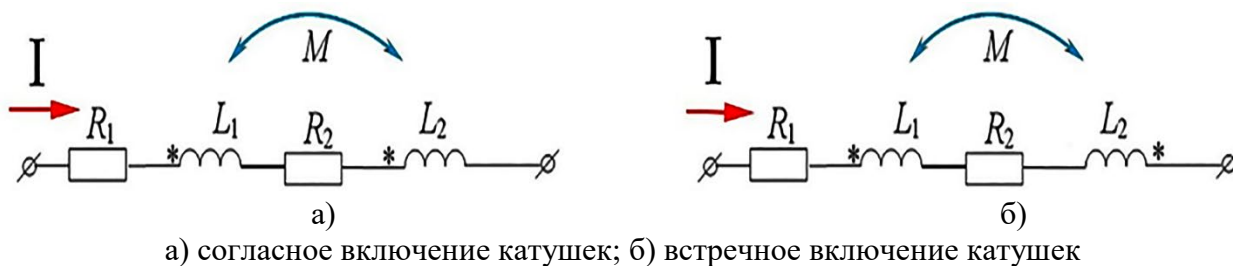


**Рисунок 6.1 – Схематические обозначения
индуктивно связанных катушек с взаимной индуктивностью**

В установившемся синусоидальном режиме действующие значения напряжений само- и взаимоиндукции равны:

$$U_{1L} = X_{1L}I_1; U_{1M} = X_M I_2; U_{2L} = X_{2L}I_2; U_{2M} = X_M I_1 \quad (6.6)$$

где $X_M = \omega M$ – сопротивление взаимной индукции.

Наличие индуктивной связи изменяет величину эквивалентного реактивного сопротивления. Для последовательного соединения индуктивно связанных катушек:

$$X_{\Sigma}^{\text{согл}} = X_1 + X_2 + 2X_M = \omega(L_1 + L_2 + 2M) = \omega L_{\Sigma}^{\text{согл}},$$

$$X_{\Sigma}^{\text{встр}} = X_1 + X_2 - 2X_M = \omega(L_1 + L_2 - 2M) = \omega L_{\Sigma}^{\text{встр}}$$

Следовательно, по данным опытов могут быть найдены сопротивления взаимной индукции X_M и взаимная индуктивность M :

$$X_M = \frac{X_{\Sigma}^{\text{согл}} - X_{\Sigma}^{\text{встр}}}{4}; M = \frac{X_M}{\omega} \quad (6.7)$$

Сравнение величин эквивалентных сопротивлений схем приводит к способу экспериментального определения одноименных зажимов: если при одинаковом напряжении измерить токи при согласном и встречном включении катушек, то ток при встречном включении окажется больше.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. В чем сущность явления самоиндукции, взаимной индукции?
2. Какие факторы влияют на индуктивность?
3. Определите физический смысл коэффициента взаимной индуктивности.
4. По какому закону изменяются токи включения и отключения источника в цепи постоянного тока?
5. Какое сопротивление переменному току оказывает индуктивность цепи?

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Соберите цепь, как показано на рисунке 6.2, для определения параметров индуктивной катушки.

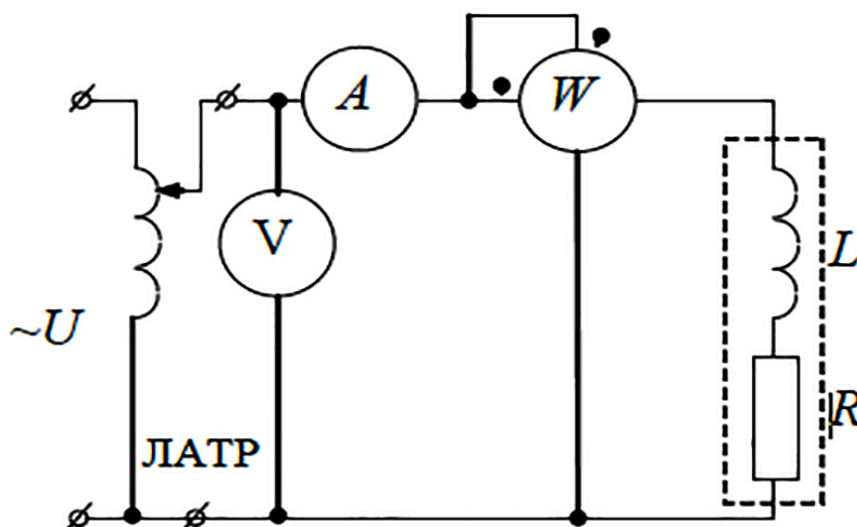


Рисунок 6.2 – Схема экспериментальной цепи для определения параметров индуктивной катушки

2. Подключите первую катушку к источнику питания. Изменяя автотрансформатором напряжение на входе, установите ток в катушке по заданию преподавателя. Наведенную ЭДС во второй катушке E_{21} , измерьте электронным вольтметром. Показания приборов запишите в таблицу 6.1. Показаний тока должно быть не менее трех в диапазоне от 0,5 А до 1,5 А.

Лабораторная работа 6. Исследование электрических цепей со взаимной индуктивностью

Таблица 6.1 – Определение параметров первой катушки

Номер п/п	Измерено					Вычислено						
	I , А	U , В	P , Вт	E_{21} , В	E_{12} , В	R , Ом	Z , Ом	X , Ом	L , Гн	$\cos\varphi$	M , Гн	K
1												
2												
3												

3. Экспериментально определите параметры второй катушки. Для этого подключите вторую катушку к источнику питания. Изменяя автотрансформатором напряжение на входе, установите такой же ток в катушке, как и в предыдущем опыте. Наведенную ЭДС в первой катушке E_{12} , измерьте электронным вольтметром. Показания приборов запишите в таблицу 6.2. Показаний тока должно быть не менее трех.

Таблица 6.2 – Определение параметров второй катушки

Номер п/п	Измерено					Вычислено						
	I , А	U , В	P , Вт	E_{21} , В	E_{12} , В	R , Ом	Z , Ом	X , Ом	L , Гн	$\cos\varphi$	M , Гн	K
1												
2												
3												

При определении параметров индуктивных катушек по экспериментальным данным используйте формулы (табл. 6.1 и 6.2):

- 1) активное сопротивление катушки: $R = P/I^2$;
- 2) полное сопротивление катушки: $Z = U/I$;
- 3) реактивная составляющая катушки индуктивности: $X = \sqrt{Z^2 - R^2}$;
- 4) индуктивность катушки: $L = X/\omega$;
- 5) косинус φ :

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

- 6) коэффициент взаимности:

$$M = \frac{E_{21}}{\omega \cdot I_1} = \frac{E_{12}}{\omega \cdot I_2}$$

7) коэффициент индуктивной связи:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$$

4. Экспериментально исследуйте последовательное соединение катушек, включенных согласно и встречно. Для этого соберите цепь (рис. 6.3), соединив индуктивные катушки последовательно. Показаний тока должно быть не менее трех в диапазоне от 0,5 А до 1,5 А. Запишите показания приборов в таблицу 6.3.

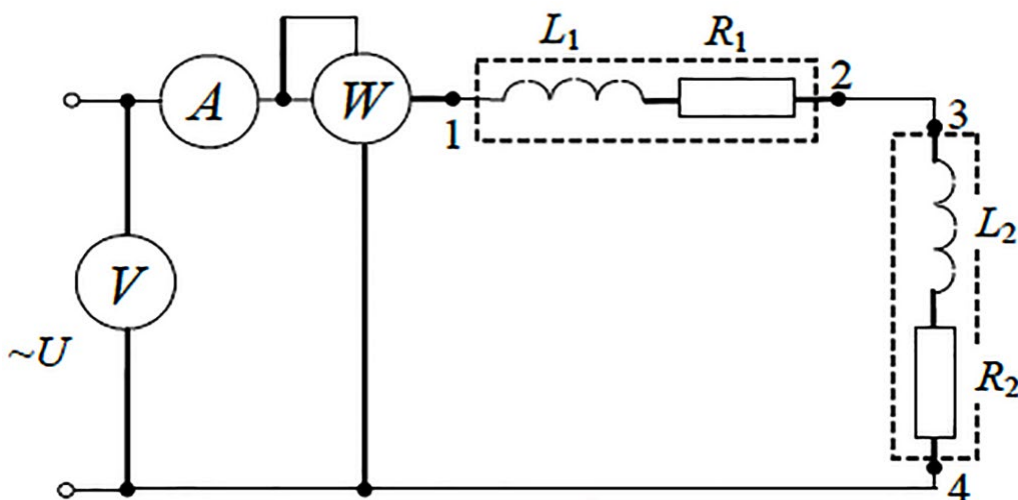


Рисунок 6.3 – Схема экспериментальной цепи для последовательного соединения катушек индуктивности

Таблица 6.3 – Последовательное соединение индуктивно-связанных катушек

Вид соединения	Измерено					Вычислено			
	I , А	U , В	U_1 , В	U_2 , В	P , Вт	R , Ом	Z , Ом	X , Ом	M , Гн
Согласное									
Встречное									

5. По данным таблицы 6.3, для одного из значений тока постройте векторные диаграммы в соответствующем масштабе для согласного и встречного включения катушек на комплексной плоскости.

Указания к построению векторной диаграммы

При построении векторной диаграммы нужно использовать уравнение трансформатора:

$$\dot{I}_1 \cdot (R_1 + j\omega L_1) + j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_1; \quad \dot{I}_2 \cdot (R_2 + j\omega L_2) + j\omega M \dot{I}_1 + \dot{I}_2 Z_H = 0$$

При согласованной направлении магнитных потоков по направлению вектора тока $\dot{I}$ откладывается вектор активной составляющей $\dot{I} \cdot R_1$ напряжения $\dot{U}_1$. Составляющая индуктивного напряжения $j\omega L_1 \dot{I}$ и взаимной индуктивности $j\omega M \dot{I}$ опережают вектор тока на угол $\pi/2$. Замыкающий вектор дает напряжение $\dot{U}_1$. Вектор напряжения на второй катушке $\dot{U}_2$ получается путем сложения трех векторов: активного напряжения $\dot{I} \cdot R_2$, совпадающего по фазе с током; индуктивного напряжения $j\omega L_2 \dot{I}$, опережающего ток на угол $\pi/2$; напряжения взаимной индуктивности $j\omega M \dot{I}$, опережающий ток на угол $\pi/2$. Складывая векторы напряжения катушек $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$, получим вектор полного напряжения, приложенного к обеим катушкам $\dot{U}$.

При встречном включении построение диаграммы такое же, за исключением того, что векторы индуктивных напряжений и напряжений взаимной индуктивности направлено встречно.

Сделайте выводы по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие цепи называются индуктивно-связанными?
2. Как в результате эксперимента определить коэффициент взаимной индукции?
3. Как в результате эксперимента определить одноименные концы индуктивно-связанных катушек?
4. Как рассчитать коэффициент индуктивной связи?

-
5. Как в результате эксперимента определить индуктивность обмотки реле?
 6. Как проводится «развязка» индуктивно связанных обмоток?
 7. Какими параметрами характеризуются индуктивно-связанные элементы?
 8. Прокомментируйте порядок построения векторной диаграммы трансформатора.
 9. Что такое «вносимое сопротивление»? От чего оно зависит?
 10. Как строятся векторные диаграммы при последовательном соединении индуктивно-связанных катушек?

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЦЕПЯМ СО ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

1. Статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки на каком-либо магнитопроводе и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем (напряжений) переменного тока в одну или несколько других систем (напряжений), без изменения частоты – это:

- 1) трансформатор;
- 2) стабилизатор;
- 3) преобразователь.

2. Укажите, может ли быть коэффициент индуктивной связи двух катушек больше единицы?

- 1) да;
- 2) нет.

3. Укажите значение взаимной индуктивности M двух катушек с коэффициентом связи $K_M = 1$, если при их согласном и при встречном последовательном включении полные индуктивные сопротивления соответственно равны: $X' = 8 \text{ Ом}$ и $X'' = 4 \text{ Ом}$. Угловая частота напряжения при испытании $\omega = 100 \text{ рад/с}$.

- 1) 6 мГн; 2) 2 мГн;
- 3) 10 мГн; 4) 8 мГн.

4. Укажите, могут ли существовать одновременно нижеследующие условия для двух индуктивно связанных катушек: $L_1 > M$ и $L_2 < M$:

- 1) да;
- 2) нет.

5. Укажите вид соединения индуктивно связанных катушек, если в опытах при их последовательном соединении с источником синусоидального напряжения были получены следующие значения:

Первый опыт: $P_1 = 865 \text{ Вт}$; $U_1 = 120 \text{ В}$; $I_1 = 12 \text{ А}$.

Второй опыт: $P_2 = 600 \text{ Вт}$; $U_2 = 120 \text{ В}$; $I_2 = 10 \text{ А}$.

- 1) первый опыт – согласное; второй опыт – встречное;
- 2) первый опыт – встречное; второй опыт – согласное.

6. Известен ток $I_1 = 2 \text{ А}$ первой катушки и напряжение $U_{2x} = 1 \text{ В}$ на зажимах разомкнутой второй катушки, индуктивно связанной с первой катушкой. Укажите, чему равна взаимная индуктивность катушек, если угловая частота напряжения 100 рад/с ?

- 1) 2 Гн; 2) 3 мГн;
- 3) 4 мГн; 4) 5 мГн.

7. Укажите, чему равна индуктивность вторичной обмотки идеального двухобмоточного воздушного трансформатора, если известны токи и напряжения при питании обмоток вначале со стороны первичной обмотки:

$$U_1 = 5 \text{ В}, I_1 = 10 \text{ А}$$

а затем со стороны вторичной обмотки:

$$U_2 = 5 \text{ В}, I_2 = 20 \text{ А}$$

Угловая частота питающего напряжения $\omega = 100 \text{ рад/с}$.

1) 0,5 мГн; 2) 1 мГн;

3) 2,5 мГн; 4) 4 мГн.

8. Укажите значение ЭДС взаимоиндукции первичной обмотки идеального трансформатора ($k_M = 1$), если известны ток $I_1 = 1 \text{ А}$ и $U_{2X} = 0,5 \text{ В}$ при питании трансформатора со стороны первичной обмотки и ток $I_2 = 4 \text{ А}$ и $U_{1X} = 0,1 \text{ В}$ при питании со стороны вторичной обмотки.

1) 0,1 В; 2) 0 В;

3) 0,2 В; 4) 0,3 В.

9. Укажите соотношение между токами при согласном (I_C) и встречном (I_B) последовательном включении двух индуктивно связанных катушек и источника синусоидального напряжения:

1) связь неоднозначна;

2) $I_C < I_B$;

3) $I_C = I_B$;

4) $I_C > I_B$.

10. При параллельном соединении эквивалентное сопротивление за счет индуктивной связи ... при согласном включении, а при встречном

1) соответственно увеличивается и уменьшается;

2) соответственно уменьшается и увеличивается;

3) соответственно не изменится и уменьшается.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ОДНОФАЗНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ, СОЕДИНЕННЫМИ ЗВЕЗДОЙ

Цель работы: 1) приобрести навыки исследования трехфазной цепи переменного тока, соединенной по схеме «звезда»; 2) изучить влияние параметров одного из трех однофазных приемников, соединенных звездой при их включении в четырехпроводную и трехпроводную сеть.

Общие теоретические сведения

Трехфазной системой электрических цепей называется система, состоящая из трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга на одну треть периода (то есть на 120 градусов) и создаваемые одним источником электрической энергии.

В качестве источника электрической энергии в трехфазных цепях используют **трехфазные синхронные генераторы**. В трех обмотках синхронного генератора, называемых фазами, индуктируются указанные электродвижущие силы E_A ; E_B ; E_C .

От трехфазного источника по проводам трехфазной сети получают питание как трехфазные, так и однофазные приемники электрической энергии.

Трехфазные электрические цепи имеют ряд **преимуществ по сравнению с однофазными:**

1) возможность использования наиболее простых, надежных и дешевых асинхронных электродвигателей;

2) меньший расход проводниковых материалов на сооружение линий электропередач и электрических сетей;

3) возможность получения двух эксплуатационных напряжений (660/380 В; 380/220 В; 220/127 В);

4) лучшие экономические показатели трехфазных генераторов и трансформаторов.

Благодаря своим преимуществам трехфазные цепи получили более широкое применение по сравнению с другими видами электрических цепей.

Соединение, при котором концы однофазных приемников или концы трехфазной нагрузки соединены в одной точке (нейтральная точка), а начала, подключены к линейным проводам, называется **звездой** (рис. 7.1). Работа системы не нарушается, если к одной точке подсоединить начала, а концы подключить к линейным проводам. Важно, чтобы в одной точке соединялись одноименные выводы (начала или концы фаз между собой).

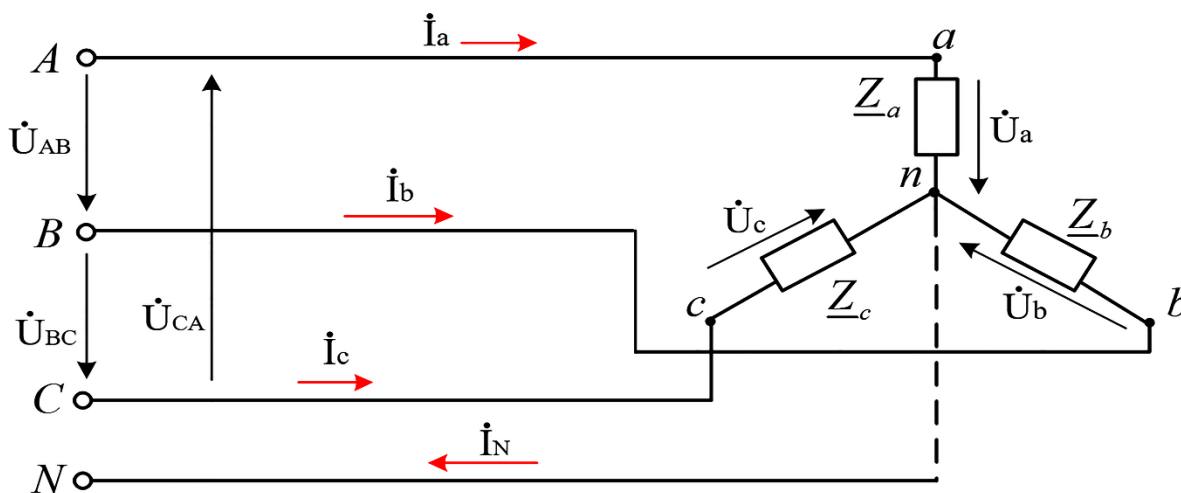


Рисунок 7.1 – Соединение потребителя звездой

При соединении потребителя звездой трехфазная цепь может быть четырехпроводная или трехпроводная. На рисунке 7.1 показана четырехпроводная цепь (имеет нейтральный (нулевой) провод).

Напряжения между началами и концами фаз генератора (или приемника) или напряжения между каждым из линейных проводов и нейтральной точкой называют *фазными напряжениями* и обозначают в общем случае U_ϕ (напряжения отдельных фаз U_a ; U_b ; U_c). Напряжения между линейными проводами

или между началами фаз называют *линейными напряжениями* и обозначают U_L или U_{ab} ; U_{bc} ; U_{ca} .

Соотношение между линейными и фазными напряжениями в векторной форме представлено выражениями (7.1):

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{U}_L \cdot e^{j30^\circ}; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_L \cdot e^{-j90^\circ}; \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A = \dot{U}_L \cdot e^{j150^\circ}\end{aligned}\quad (7.1)$$

Линейными токами называют токи I_L , протекающие по линейным проводам. *Фазные токи* – это токи I_ϕ , протекающие по фазам приемника.

При соединении звезда соотношение линейных и фазных токов имеет вид равенства (7.2):

$$I_L = I_\phi \quad (7.2)$$

Провод, соединяющий нейтральную точку генератора и приемника, называется *нейтральным проводом*. Если сопротивления приемников отдельных фаз Z_a, Z_b, Z_c будут равны между собой, равны и их коэффициенты мощности $\cos\varphi_a = \cos\varphi_b = \cos\varphi_c = \cos\varphi$, и в данном случае такая нагрузка называется *симметричной*.

На рисунке 7.2, а показана векторная диаграмма напряжений и токов для симметричной активно-индуктивной нагрузки ($\varphi \neq 0$). Из векторной диаграммы (рис.7.2, а) видно:

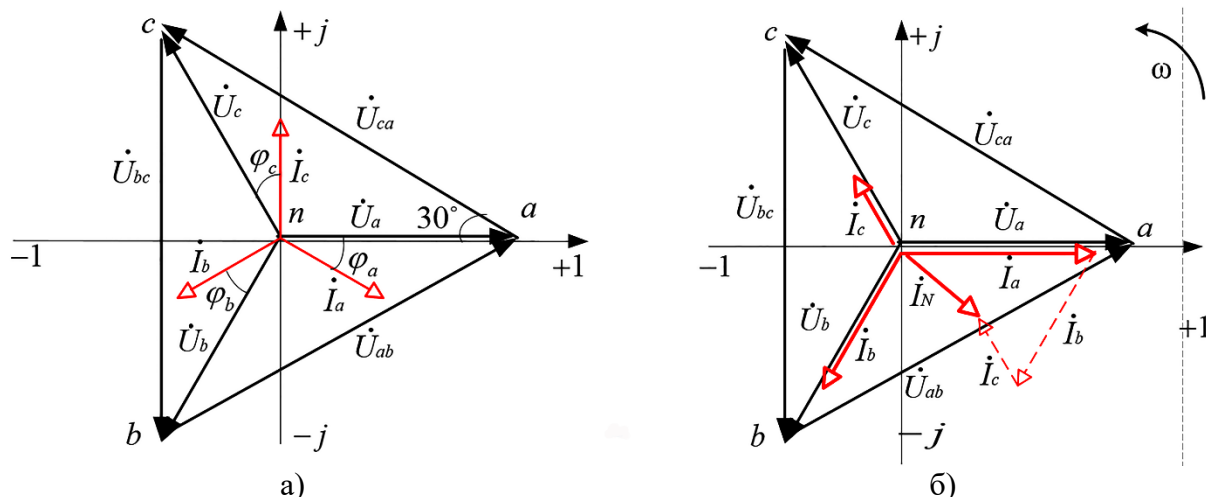
$$\frac{U_L}{2} = U_\phi \cdot \cos 30^\circ \text{ откуда } U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi \quad (7.3)$$

Фазные токи приемников определяются также, как и в однофазных цепях (по закону Ома):

$$I_a = \frac{\dot{I}_a}{\underline{Z}_a}; \quad I_b = \frac{\dot{I}_b}{\underline{Z}_b}; \quad I_c = \frac{\dot{I}_c}{\underline{Z}_c} \quad (7.4)$$

Ток в нейтральном проводе определяется по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \quad (7.5)$$



а) при симметричной активно-индуктивной нагрузке трехпроводной системы;
б) при активной несимметричной нагрузке четырехпроводной системы

Рисунок 7.2 – Векторная диаграмма токов и напряжений

При равномерной нагрузке необходимость в нейтральном проводе отпадает, так как ток в нем будет отсутствовать ($I_N = 0$), и линия в этих случаях выполняется трехпроводной (рис. 7.2, а).

На рисунке 7.2, б показано графическое определение тока в нейтральном проводе для чисто активной ($\cos \varphi = 1$) неравномерной нагрузки фаз. При наличии нейтрального провода и несимметричной нагрузки фаз напряжение на фазах приемников U_ϕ остается неизменным.

При несимметричной нагрузке трехфазной цепи, соединенной звездой без нейтрального провода, происходит несимметрия фазных напряжений приемника. Между нейтральной точкой генератора и приемника возникает напряжение смещения нейтрали (7.6):

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \quad (7.6)$$

где $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ – проводимости ветвей.

Токи в ветвях находятся из выражений (7.7):

$$\begin{cases} \dot{I}_A = (\dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}) \cdot \underline{Y}_A; \\ \dot{I}_B = (\dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}) \cdot \underline{Y}_B; \\ \dot{I}_C = (\dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}) \cdot \underline{Y}_C \end{cases} \quad (7.7)$$

Рассмотрим приемник с неоднородным сопротивлением фаз, одна из которых изменяется. Пусть полные проводимости двух фаз равны активной, а полная проводимость третьей фазы равна емкостной проводимости:

$$\underline{Y}_B = \underline{Y}_C = g; \underline{Y}_A = -jb_c$$

Причем емкостная проводимость изменяется от нуля до ∞ .

В случае, когда $b = g$, напряжение смещения нейтрали будет равно:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Nn} &= \frac{\dot{U}_A \cdot jb + \dot{U}_A \cdot e^{-j120^\circ} \cdot g + \dot{U}_A \cdot e^{j120^\circ} \cdot g}{2g + jb} = \\ &= \dot{U}_A \cdot \frac{j + e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ}}{2 + j} = \dot{U}_A \cdot (-0,2 + j0,6) \end{aligned} \quad (7.8)$$

Напряжения двух одинаковых по проводимости фаз нагрузки составят:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{bn} &= \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn} = \dot{U}_\phi \cdot (-0,5 - j0,866) - \\ &- \dot{U}_\phi \cdot (-0,2 + j0,6) = \dot{U}_\phi \cdot (-0,3 - j1,466) \\ \text{или } \dot{U}_{bn} &= \dot{U}_\phi \cdot \sqrt{0,3^2 + 1,466^2} = 1,5 \cdot U_\phi \\ \dot{U}_{cn} &= \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} = \dot{U}_\phi \cdot (-0,5 + j0,866) - \\ &- \dot{U}_\phi \cdot (-0,2 + j0,6) = 0,4 \cdot U_\phi \end{aligned} \quad (7.9)$$

Следовательно, напряжение на фазе В нагрузки будет выше напряжения на фазе С в 3,7 раза, хотя проводимости этих фаз одинаковы. По найденному значению вектора напряжения смещения нейтрали $\dot{U}_{Nn}$ можно определить положение точки n на топографической диаграмме. Как видно из диаграммы (рис. 7.3, б), напряжения на фазах приемника будут различными.

Следует отметить, что соединения звездой без нейтрального провода при несимметричной нагрузке фаз обычно не применяются. Наиболее распространенными номинальными напряжениями приемников переменного тока являются напряжения 660; 380; 220 и 127 В. Напряжения 660 и 380 В используют

преимущественно для питания промышленных приемников, а напряжения 220 и 127 В для бытовых приемников. Способ включения приемника в сеть трехфазного тока зависит от линейного напряжения сети и от номинального напряжения приемника.

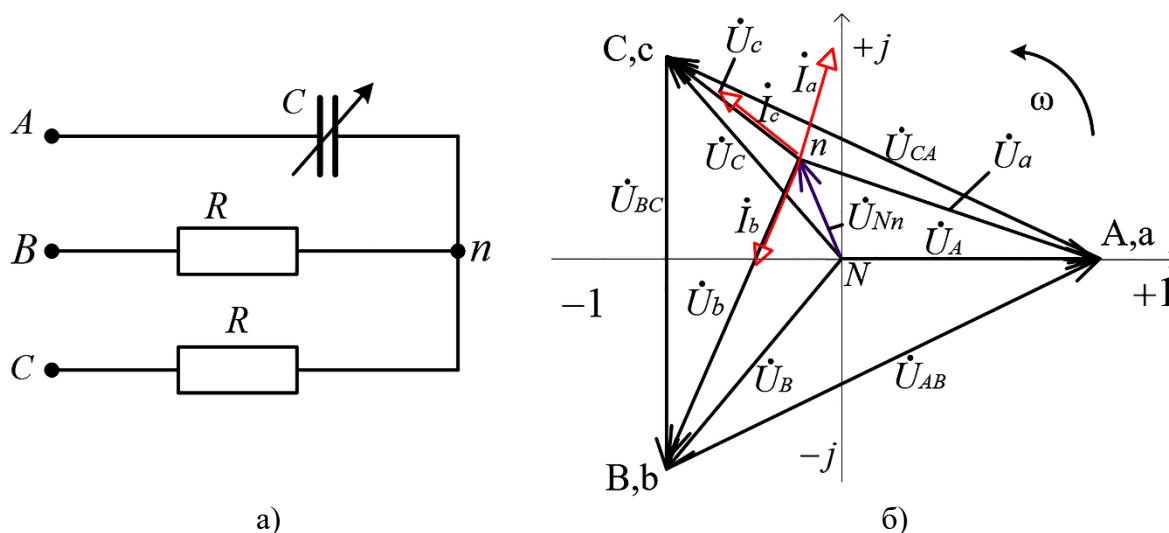


Рисунок 7.3 – Схема включения неоднородных приемников а) и топографическая диаграмма напряжений б)

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. В чем преимущества трехфазной цепи перед однофазной?
2. Что такое фазные и линейные напряжения, токи?
3. Каково назначение нейтрального провода при соединении звездой?
4. Где на практике встречаются четырехпроводные и трехпроводные системы трехфазной цепи?
5. В чем отличия и преимущества четырехпроводной и трехпроводной цепей?

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Соберите схему соединения потребителя звездой, согласно рисунку 7.4. В качестве однофазных приемников используются резисторы (активная нагрузка, $\cos \varphi = 1$), катушка индуктивности Z_K (активное сопротивление R_K ;

индуктивное сопротивление X_L) или конденсатор емкости X_C (емкостное сопротивление X_C).

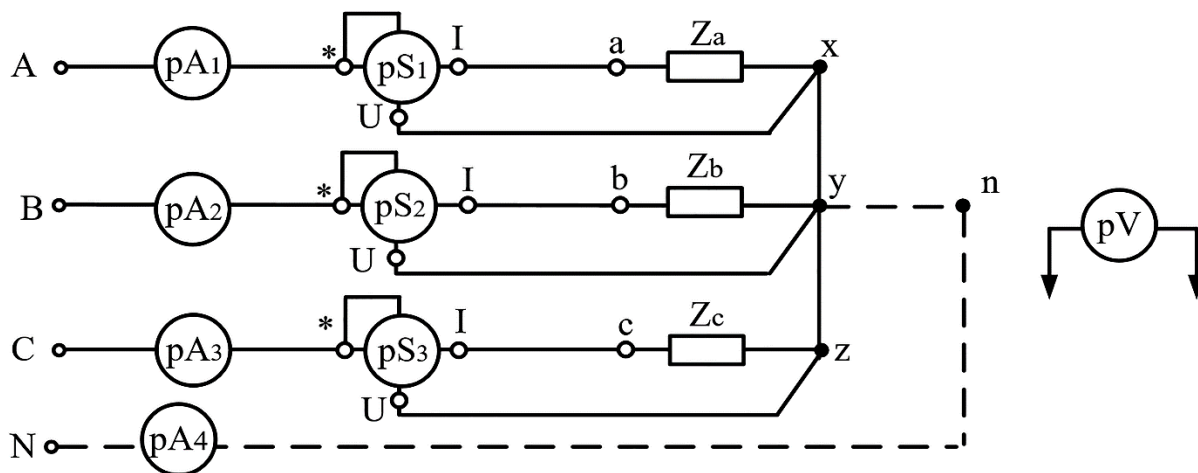


Рисунок 7.4 – Электрическая схема экспериментальной цепи

2. Произведите измерения фазных и линейных значений токов и напряжений в четырехпроводной сети (с нейтральным проводом) (табл. 7.1) для следующих режимов:

1) симметричная однородная нагрузка: все сопротивления трех фаз одинаковы по величине (симметричная), а также по характеру (однородная) нагрузки;

2) несимметричная однородная нагрузка: сопротивления в фазах должны быть одинаковы по характеру (однородная), но отличаться по величине (несимметричная); однородность нагрузки достигается включением в каждую фазу резисторов; несимметричность – подключением дополнительного резистора в фазу, заданную преподавателем;

3) неоднородная нагрузка: сопротивления в фазах должны быть неодинаковы по характеру; это достигается включением в фазы трехфазной системы резистора (активное сопротивление R), катушки индуктивности Z_K (активное сопротивление R_K ; индуктивное сопротивление X_L) или конденсатора емкости (емкостное сопротивление X_C).

Примечание: вид нагрузки для каждой фазы задается преподавателем.

Таблица 7.1 – Соединение звездой (четырёхпроводная система)

Вид нагрузки	Измеряемые величины									
	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$U_a,$ B	$U_b,$ B	$U_c,$ B	$I_a,$ A	$I_b,$ A	$I_c,$ A	$I_N,$ A
Симметричная однородная нагрузка										
Несимметричная однородная нагрузка										
Неоднородная нагрузка										

3. Отключите нейтральный провод (трехпроводная система). Исследования проведите в соответствии с таблицей 7.2.

Таблица 7.2 – Соединение звездой (трехпроводная система)

Вид нагрузки	Измеряемые величины									
	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$U_a,$ B	$U_b,$ B	$U_c,$ B	$U_{Nn},$ B	$I_a,$ A	$I_b,$ A	$I_c,$ A
Симметричная однородная нагрузка										
Несимметричная однородная нагрузка										
Неоднородная нагрузка										

4. При выполнении работы необходимо убедиться, что линейные напряжения одинаковы для всех схем и режимов работы фаз нагрузки.

5. Проследите за изменением фазных напряжений и тока в нейтральном проводе при четырёхпроводной системе для разных видов нагрузки.

6. Постройте векторные диаграммы токов и напряжений для каждого случая таблиц 7.1, 7.2 (шесть диаграмм).

Сделайте выводы по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Чему равен ток в нейтральном проводе при симметричной однородной нагрузке; при несимметричной нагрузке?
2. Как влияет характер и величина нагрузки на ток в нейтральном проводе?
3. Чему равны фазные напряжения при несимметричной однородной нагрузке? Почему?
4. Чему равны линейные напряжения при всех режимах работы фаз нагрузки четырехпроводной системы? Почему?
5. Чему равны линейные напряжения при всех режимах работы фаз нагрузки трехпроводной системы? Почему?
6. В какой из трехфазных систем возникает напряжение смещения нейтрали?
7. Что такое неоднородная нагрузка? Чем она отличается от однородной? Как ее сделать в трехфазной системе?
8. Что такое несимметричная однородная нагрузка? Чем она отличается от симметричной? Как их сделать в трехфазной системе?
9. Сравните несимметричную однородную нагрузку четырех- и трехпроводной систем.
10. Как влияет индуктивное сопротивление и емкостное сопротивление на ток в нейтральном проводе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ОДНОФАЗНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ, СОЕДИНЕННЫМИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Цель работы: 1) приобрести навыки исследования трехфазной цепи, включенной по схеме «треугольник»; 2) изучить влияние изменения параметров одного из трех однофазных приемников, соединенных треугольником на соотношения между линейными, фазными токами и напряжениями.

Общие теоретические сведения

Для соединения трех однофазных приемников при включении их в трехфазную сеть треугольником необходимо конец первой фазы соединить с началом второй, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой, а затем к местам соединения фаз подвести линейные провода (рис. 8.1).

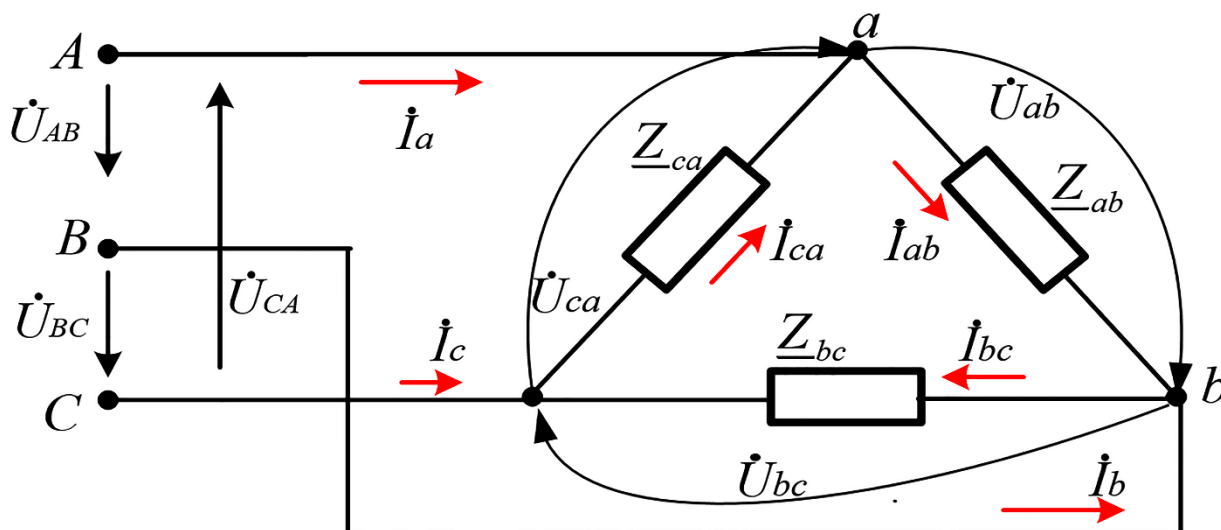


Рисунок 8.1 – Соединение потребителя треугольником

Каждая фаза приемника при соединении треугольником подключена к двум линейным проводам. Поэтому независимо от величины и характера сопротивлений приемника, каждое фазное напряжение при соединении треугольником равно соответствующему линейному напряжению: $U_{\phi} = U_{\text{л}}$.

Фазные напряжения на генераторе являются также линейными (8.1):

$$U_A = U_{AB}; U_B = U_{BC}; U_C = U_{CA} \quad (8.1)$$

Соединение треугольником следует применять тогда, когда каждая фаза трехфазного приемника или однофазные приемники рассчитаны на напряжение, равное номинальному линейному напряжению сети.

Фазные токи I_{ab} ; I_{bc} ; I_{ca} – это токи, протекающие по фазе. В общем случае они не равны линейным токам I_a ; I_b ; I_c .

Линейные токи определяются из первого закона Кирхгофа. Для этого используются узловые точки a , b , c (рис. 8.1). Получаются следующие соотношения между линейными и фазными токами (первый закон Кирхгофа):

$$\begin{aligned} I_a &= I_{ab} - I_{ca}; I_b = I_{bc} - I_{ab}; I_c = I_{ca} - I_{bc} \end{aligned} \quad (8.2)$$

где I_a ; I_b ; I_c – линейные токи трехфазной цепи, А;
 I_{ab} ; I_{bc} ; I_{ca} – фазные токи нагрузки, А.

При **симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке**, то есть при $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$, фазные токи одинаковы по значению. Значит, линейные токи также равны между собой. Векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений (рис. 8.2, а) изображены для активно-индуктивной ($\varphi = 90^\circ$) равномерной нагрузки фаз при соединении приемников треугольником. На рисунке 8.2, б они представлены для активной ($\varphi = 0$) симметричной нагрузки.

Из векторных диаграмм токов видно:

$$\frac{I_L}{2} = I_\phi \cdot \cos 30^\circ \text{ или } I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi \quad (8.3)$$

Зная фазные напряжения и сопротивления, нетрудно по закону Ома найти фазные токи:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}; I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}; I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}} \quad (8.4)$$

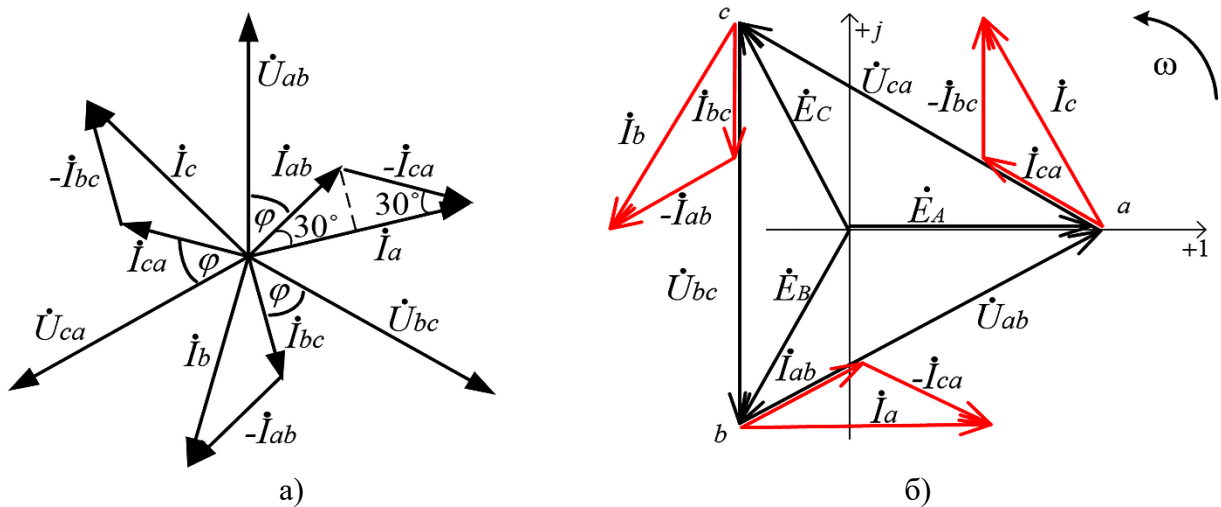


Рисунок 8.2 – Векторная диаграмма токов и напряжений а); векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений б)

Фазные (они же линейные) напряжения равны между собой, к тому же сопротивления фаз при симметричной нагрузке также равны между собой, значит фазные токи (по закону Ома) равны между собой: $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_{\phi}$.

Углы сдвига фаз между фазными напряжениями и токами определяются с помощью значений сопротивлений фаз (8.5):

$$\varphi = \arccos \frac{X_{\phi}}{R_{\phi}} \quad (8.5)$$

Если нагрузка чисто активная, то угол сдвига фаз между напряжением и током равен нулю ($\varphi = 0^\circ$); если на фазе чисто индуктивная нагрузка, то напряжение опережает ток на угол $\varphi = 90^\circ$; если на фазе чисто емкостная нагрузка, то напряжение отстает от тока на угол $\varphi = 90^\circ$.

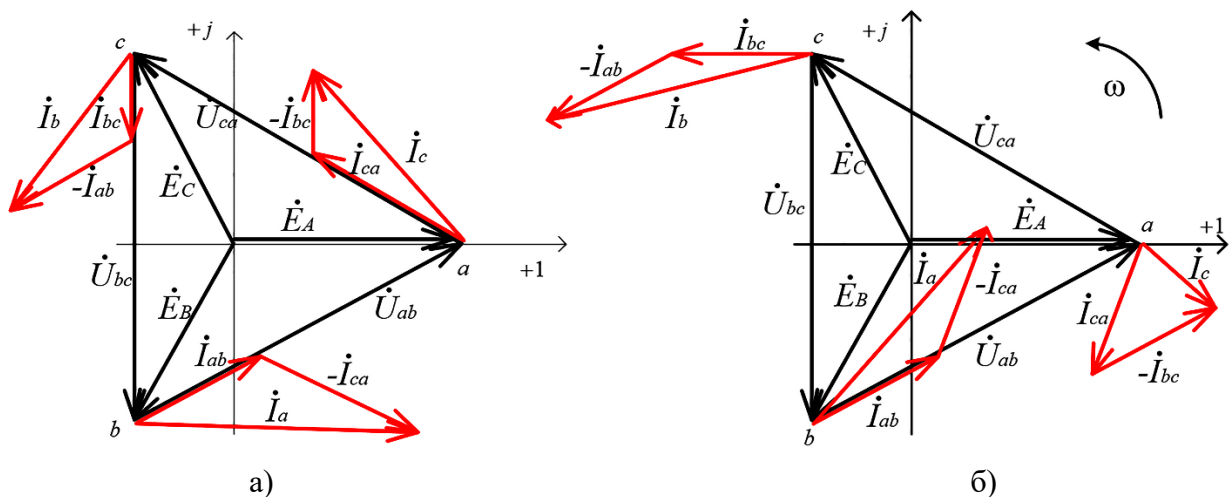
Коэффициент мощности приемника определяется из соотношения (8.6):

$$\cos \varphi = \frac{R_{\phi}}{Z_{\phi}} \quad (8.6)$$

Если сопротивления фаз не одинаковы по значению $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$ при соединении фаз треугольником, то такая нагрузка является несимметричной.

Несимметричная нагрузка возникает обычно при питании от трехфазной сети однофазных приемников. Изменяться будут линейные токи в проводах, соединенных с данной фазой, так как может меняться значение фазного тока. Поэтому схему соединения треугольником используют для включения несимметричных однородных приемников, в частности осветительных приборов, в трехпроводную осветительную сеть.

Токи в фазах будут не равны $I_{ab} \neq I_{bc} \neq I_{ca}$. Поэтому не будет образовываться симметричной системы для токов (рис. 8.3).



а) несимметричная чисто активная нагрузка;

б) неоднородная симметричная нагрузка

Рисунок 8.3 – Векторные диаграммы токов и топографические диаграммы напряжений при соединении треугольником

Линейные токи при соединении фаз треугольником определяются графически из уравнений (8.3), ориентированных относительно соответствующих векторов фазных напряжений.

Векторные диаграммы токов и топографические диаграммы напряжений для несимметричной нагрузки (рис. 8.3, а); при неоднородной нагрузке – разный характер сопротивлений фаз (рис. 8.3, б): фаза «ab» имеет активное сопротивление; фаза «bc» – индуктивное; фаза «ca» – емкостное.

Особенностью соединения фаз приемника треугольником является то, что изменение режима одной из фаз приемника не отражается на режиме других фаз, так как они подключены к неизменным линейным напряжениям генератора.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Что такое фазные и линейные напряжения и токи при соединении треугольником?
2. Что представляет собой соединение треугольником?
3. Что такое несимметричная нагрузка? Как ее сделать в соединении треугольником?
4. Что такое неоднородная нагрузка? Как ее сделать в соединении треугольником?
5. Каково соотношение между линейными и фазными токами в симметричной и несимметричной системе, соединенной треугольником?

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Соберите электрическую схему экспериментальной цепи включения однофазных приемников треугольником (рис. 8.4).
2. Произведите измерение линейных и фазных токов и напряжений для случаев нагрузки фаз, указанных в таблице 8.1:
 - 1) **симметричная однородная нагрузка:** все сопротивления трех фаз одинаковы по величине (*симметричная*), а также по характеру (*однородная*);
 - 2) **несимметричная однородная нагрузка:** сопротивления фаз должны быть одинаковы по характеру, но отличаться по величине; однородность нагрузки достигается включением в каждую фазу резисторов; несимметричность – подключением дополнительного резистора в фазу, заданную преподавателем;

3) неоднородная нагрузка: сопротивления в фазах должны быть неодинаковы по характеру; это достигается включением в фазы трехфазной системы резистора (активное сопротивление R), катушки индуктивности Z_K (активное сопротивление R_K ; индуктивное сопротивление X_L) и конденсатора емкости (емкостное сопротивление X_C).

Примечание: вид нагрузки для каждой фазы при неоднородной нагрузке задается преподавателем.

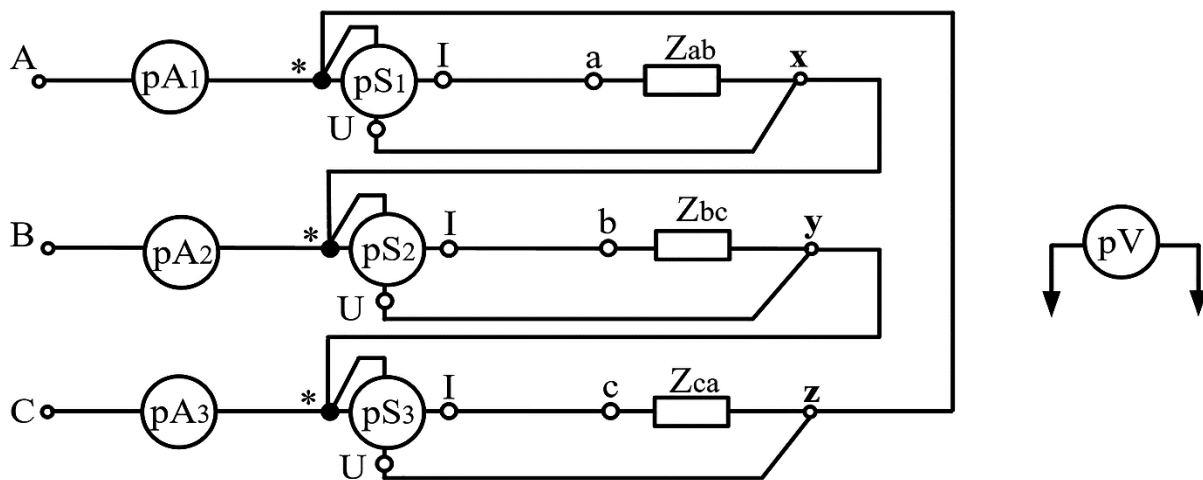


Рисунок 8.4 – Электрическая схема экспериментальной цепи

Таблица 8.1 – Соединение потребителя треугольником

Вид нагрузки	Измеряемые величины								
	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$I_{ab},$ A	$I_{bc},$ A	$I_{ca},$ A	$I_a,$ A	$I_b,$ A	$I_c,$ A
Симметричная однородная нагрузка									
Несимметричная однородная нагрузка									
Неоднородная нагрузка									

3. Постройте для всех опытов таблицы 8.1 векторные диаграммы токов и напряжений (три диаграммы).

Сделайте выводы по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Чему равны линейные токи при симметричной однородной нагрузке в соединении треугольником?
2. Чему равны линейные токи при несимметричной однородной нагрузке при соединении треугольником?
3. Как влияет характер и величина нагрузки на ток в каждой фазе при соединении треугольником?
4. Чему равны фазные напряжения при несимметричной однородной нагрузке? Почему?
5. Чему равны линейные напряжения при различных режимах работы фаз нагрузки? Почему?
6. Что такое несимметричная однородная нагрузка? Чем она отличается от симметричной? Как эти виды нагрузок собрать в трехфазной системе при соединении потребителя треугольником?
7. Что такое неоднородная нагрузка? Чем она отличается от однородной? Как эти виды нагрузок собрать в трехфазной системе при соединении потребителя треугольником?
8. Чему равны линейные токи при несимметричной однородной и симметричной неоднородной нагрузках?
9. Сравните симметричную и несимметричную однородную нагрузку при соединении потребителя треугольником.
10. Как влияет индуктивное сопротивление и емкостное сопротивление на ток в нейтральном проводе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9.
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ
ПРИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ.
МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Цель работы: 1) приобрести навыки исследования трехфазной цепи переменного тока при аварийных режимах при соединении потребителя звездой и треугольником; 2) изучить метод симметричных составляющих.

Общие теоретические сведения

Аварийные режимы зависят от способа соединения приемников в трехфазной системе. Следует отметить, что абсолютно безопасными являются разрывы в фазах нагрузки, соединенной треугольником или звездой с нулевым проводом (отключения фаз).

Аварийные режимы крайне нежелательны на практике, так как могут привести к выводу из строя, а также поломке оборудования.

При соединении трехфазной цепи в звезду возможны следующие аварийные режимы работы:

- 1) обрыв одной из фаз;
- 2) обрыв нулевого провода;
- 3) обрыв фазы и нуля;
- 4) короткое замыкание фазы при обрыве нулевого провода.

Если случайно произойдет обрыв нейтрального провода в четырехпроводной системе, то фазные токи при несимметричной нагрузке установятся такими, чтобы их сумма была равна нулю. Вследствие этого напряжения на отдельных фазах будут различными, то есть в наиболее нагруженной фазе (с меньшим сопротивлением), напряжение будет повышено.

Если же произойдет обрыв одного из линейных проводов, то эта фаза отключается, а две другие фазы продолжают нормально работать от трехфазной системы при наличии нейтрального провода. При отсутствии нейтрального провода происходит перераспределение напряжений на фазах пропорционально их сопротивлениям.

Обрыв нулевого провода не всегда вызывает аварию в трехфазных цепях. При обрыве нейтрального провода происходит перераспределение напряжений на всех фазах и токов в них. Такой режим недопустим на практике, так как изменение сопротивления одной фазы вызывает изменение режима во всех трех фазах. Предохранитель в нейтральном проводе не ставится.

Если нагрузка симметрична, то обрыв нулевого провода не изменит токов нагрузок, так как для симметричной нагрузки $I_N = 0$. Для несимметричных нагрузок $I_N \neq 0$, и поэтому такой режим может вызвать аварию.

Обрыв фазы и нулевого провода приводит к $I_N = 0$ и к исчезновению одного фазного напряжения. Потребители оставшихся фаз оказываются включенными последовательно. Токи в этих фазах будут одинаковыми, а напряжения на них будут зависеть от сопротивлений нагрузок.

При коротком замыкании одной из фаз и обрыве нулевого провода напряжение этой фазы станет равно нулю. Нагрузка по току оставшихся фаз увеличится в $\sqrt{3}$ раз по отношению к исходному значению.

При трехфазной трехпроводной системе фазные напряжения по нагрузке будут симметричны только при равномерной нагрузке фаз. При неравномерной нагрузке фаз равенство фазных напряжений нарушается. Линейные напряжения остаются симметричными. В этом случае между нейтральными точками генератора и нагрузки появляется напряжение U_{Nn} , называемое смещением нейтрали. Его величина может быть определена по формуле (9.1):

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_a + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_b + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} \quad (9.1)$$

где $\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}$; $\underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}$; $\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c}$ – фазные проводимости нагрузки.

Напряжения на фазах нагрузки составят:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}; \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}; \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} \quad (9.2)$$

При обрыве линейного провода в четырехпроводной системе потребитель оборванной фазы обесточивается, а две оставшиеся фазы продолжают работать нормально. Изменяется только ток в нейтральном проводе (рис. 9.1, а).

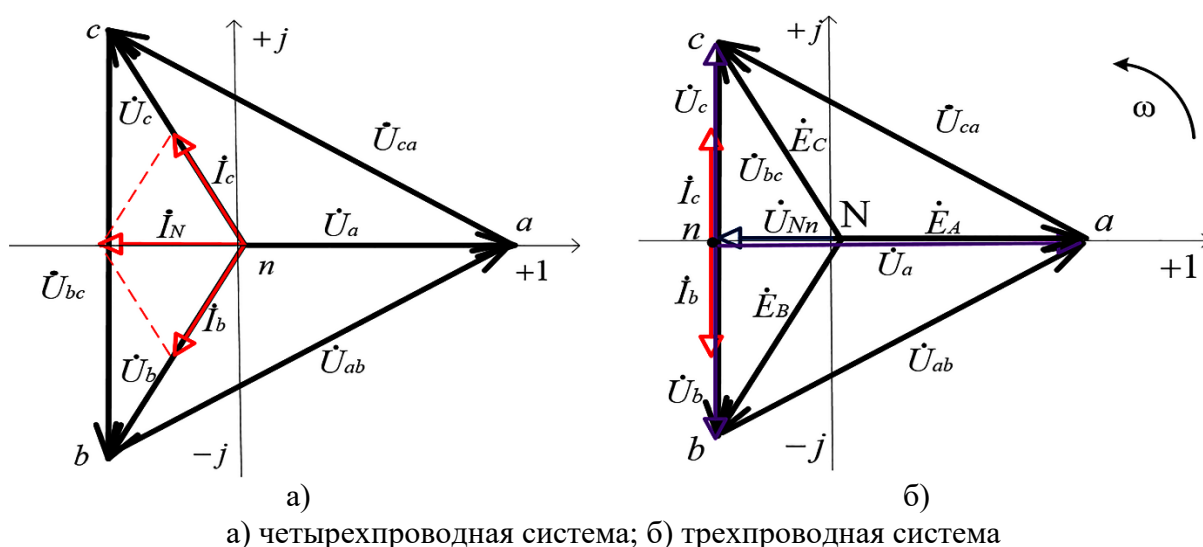


**Рисунок 9.1 – Векторная диаграмма токов
и топографическая диаграмма напряжений
для чисто активного трехфазного приемника при обрыве фазы «а»**

В трехпроводной системе (симметричная нагрузка) при обрыве фазы она обесточивается, а напряжения на двух других уменьшаются до половины линейного (в $2/\sqrt{3} = 1,155$ раза). Напряжение смещения нейтрали при этом равно половине фазного ($U_{Nn} = \frac{1}{2} U_\phi$) (рис. 9.1, б).

Режим короткого замыкания фазы при четырехпроводной системе аварийный и недопустим на практике. В трехпроводной системе при коротком замыкании фазы (рис. 9.2) напряжение на двух других повышается до линей-

ного (увеличивается в $\sqrt{3}$ раз), что вызывает соответствующее увеличение токов. Общая мощность трехфазного потребителя в этом случае увеличивается в два раза.

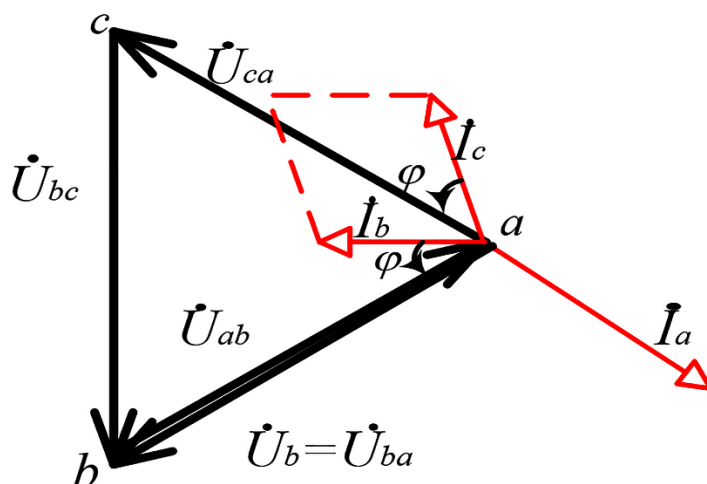


Рисунок 9.2 – Топографическая диаграмма напряжений при коротком замыкании фазы «а»

Аварийные режимы при соединении однофазных приемников трехфазной системы треугольником. Если происходит обрыв любой из фаз, то сопротивление в этой фазе будет равно бесконечности, ток по этой фазе протекать не будет.

Например, при обрыве фазы «са» сопротивление $Z_{ca} = \infty$. Ток по этой фазе приемника не протекает, значит $I_{ca} = 0$. Значения других фазных токов I_{ab} ; I_{bc} не изменяются. Кроме этого, не изменяются и значения углов сдвига фаз между напряжением и током φ_{ab} ; φ_{bc} ; фаз «ab» и «bc».

Линейные токи определяются по первому закону Кирхгофа: ток в линейном проводе «b» I_B рассчитывается также как и при симметричном режиме:

$$I_B = I_{bc} - I_{ab} \quad (9.3)$$

Поэтому этот ток не изменяется. Остальные линейные токи уменьшаются и будут определяться по формулам (9.4):

$$I_A = I_{ab} - I_{ca} = I_{ab}; I_C = I_{ca} - I_{bc} = -I_{bc} \quad (9.4)$$

Таким образом, $\dot{I}_A$ и $\dot{I}_C$ по значению становятся равными фазным токам.

На рисунке 9.3 представлена схема обрыва фазы «са» активного приемника и его векторная диаграмма напряжений и токов.

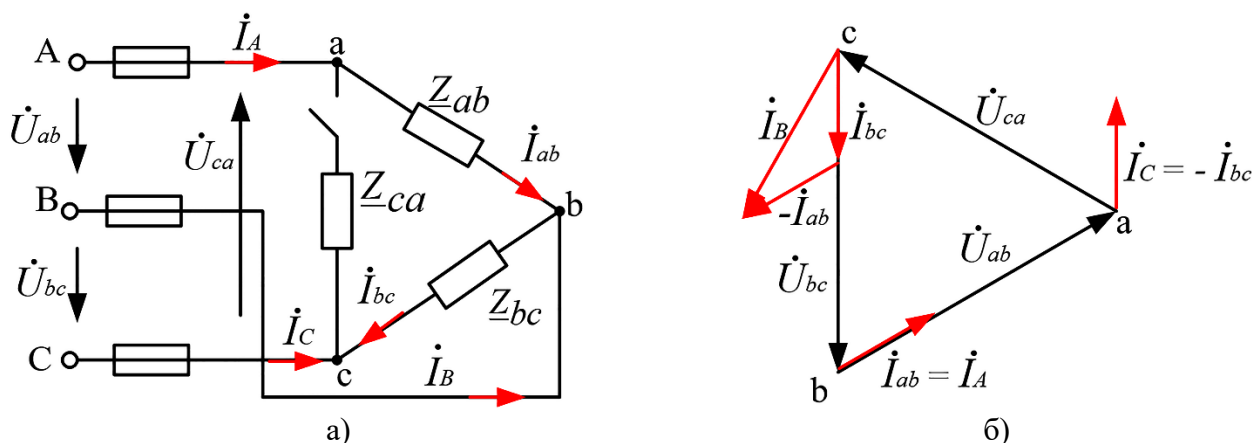


Рисунок 9.3 – Схема обрыва фазы «са» активного приемника а) и векторная диаграмма напряжений и токов б)

При обрыве любого линейного провода (перегорание предохранителя П) трехфазная цепь преобразуется в однофазную цепь (рис. 9.3, а). Фазы приемника образуют две параллельные ветви, к которым подводится напряжение.

При обрыве линейного провода «а» трехфазная цепь с активно-индуктивной нагрузкой преобразуется в однофазную цепь (рис. 9.3, а).

Фазы приемника образуют две параллельные ветви, содержащие сопротивления Z_{bc} и $Z_{bac} = Z_{ab} + Z_{ca}$, к которым подводится напряжение U_{bc} .

Ток I_{bc} в ветви с сопротивлением Z_{bc} остается неизменным, так как по-прежнему определяется тем же напряжением U_{bc} и рассчитывается по закону Ома (9.5):

$$I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}} \quad (9.5)$$

Ток, протекающий по последовательно соединенным сопротивлениям фаз Z_{ab} ; Z_{ca} обозначается I_{bac} . Этот ток совпадает по фазе с током I_{bc} , так как

тоже определяется напряжением U_{bc} , причем на каждое из этих сопротивлений приходится половина линейного напряжения U_{bc} :

$$\dot{I}_{bac} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{ca}} \quad (9.6)$$

То есть по значению ток I_{bac} в два раза меньше тока I_{bc} , так как сопротивления фаз равны между собой $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$. На топографической диаграмме напряжений (рис. 9.4, б) точка «а» располагается на середине отрезка «bc», а векторы фазных токов отстают по фазе от соответствующих напряжений на угол φ (так как нагрузка активно-индуктивная). Линейный ток I_B определяется по первому закону Кирхгофа с помощью фазных токов (9.7):

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{bac} \quad (9.7)$$

I_B совпадает по фазе с током I_{bc} , а по значению в 1,5 раза больше тока I_{bc} . Ток I_c равен по значению I_b , а по фазе ему противоположен (рис. 9.4, б).

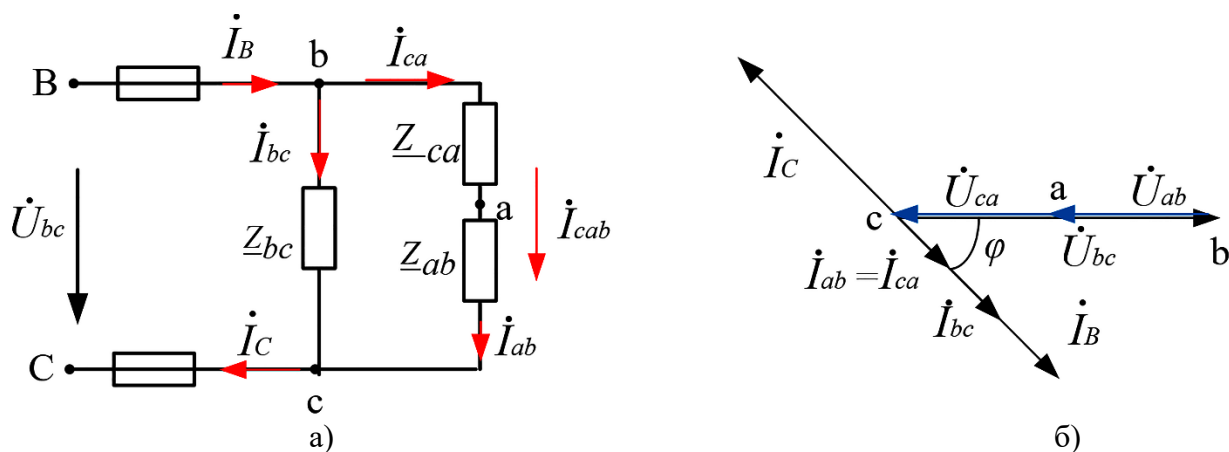


Рисунок 9.4 – Схема обрыва линейного провода «А» а) и векторная диаграмма при активно-индуктивной нагрузке б)

Метод симметричных составляющих. Для анализа и расчетов несимметричных режимов в трехфазных цепях широко применяется **метод симметричных составляющих**. Этот метод основан на представлении любой

В электрических асинхронных трехфазных двигателях токи прямой и обратной последовательности создают магнитные поля, вращающиеся в противоположных направлениях, а токи нулевой последовательности создают пульсирующее магнитное поле.

Связь между токами несимметричной системы и симметричными составляющими записывается следующими уравнениями (9.8):

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2}; \dot{I}_B = \dot{I}_{B0} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2}; \dot{I}_C = \dot{I}_{C0} + \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} \quad (9.8)$$

При записи выражений отдельных составляющих используется сокращенная запись с помощью оператора a – комплексного (поворотного или фазного) множителя, который имеет значение $a = e^{120^\circ}$.

Умножение вектора на фазный множитель соответствует повороту его против направления движения часовой стрелки на 120 градусов или повороту по направлению движения часовой стрелки (назад) на 120 градусов.

Применение оператора a позволяет записать для составляющих следующие выражения:

1. Прямой последовательности:

$$\dot{I}_{B1} = \dot{I}_{A1} \cdot e^{-120^\circ} = \dot{I}_{A1} \cdot a^2; \dot{I}_{C1} = \dot{I}_{A1} \cdot e^{120^\circ} = \dot{I}_{A1} \cdot a$$

2. Обратной последовательности:

$$\dot{I}_{B2} = \dot{I}_{A2} \cdot e^{120^\circ} = \dot{I}_{A2} \cdot a; \dot{I}_{C2} = \dot{I}_{A2} \cdot e^{-120^\circ} = \dot{I}_{A2} \cdot a^2$$

3. Нулевой последовательности:

$$\dot{I}_{A0} = \dot{I}_{B0} = \dot{I}_{C0}$$

Подстановкой этих связей в исходную систему для результирующих токов приводим ее к виду выражений (9.9):

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A1} \cdot a^2 + \dot{I}_{A2} \cdot a, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A1} \cdot a + \dot{I}_{A2} \cdot a^2 \end{aligned} \quad (9.9)$$

Исходя из системы уравнений (9.9) и учитывая, что $1 + a + a^2 = 0$ можно получить следующие выражения для векторов нулевой, прямой и обратной последовательностей через векторы несимметричной системы (9.10):

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A0} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C), \\ \dot{I}_{A1} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B \cdot a^2 + \dot{I}_C \cdot a), \\ \dot{I}_{A2} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B \cdot a + \dot{I}_C \cdot a^2) \end{aligned} \quad (9.10)$$

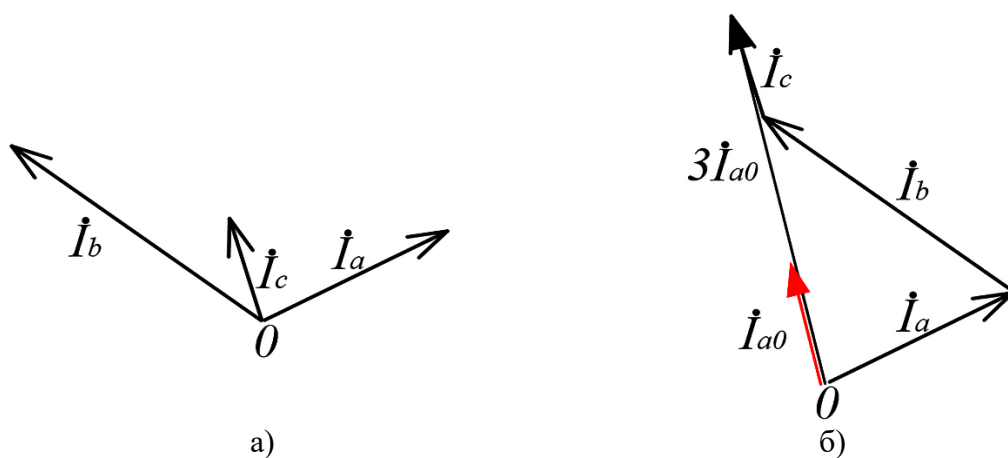


Рисунок 9.6 – Несимметричный режим а) и нулевая составляющая б)

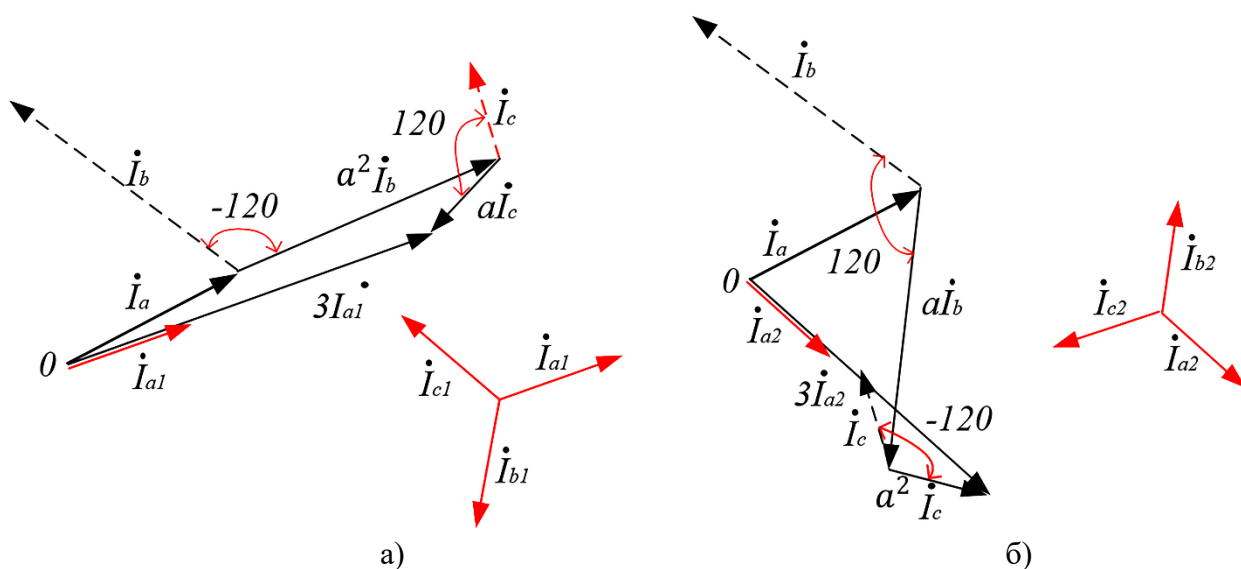


Рисунок 9.7 – Графическое построение прямой а), обратной составляющей б)

Пользуясь уравнениями (9.10), можно найти векторы симметричных составляющих аналитически или графически. На рисунках 9.6 и 9.7 приведены примеры графического определения симметричных составляющих для несимметричной системы векторов A, B, C .

Симметричные составляющие токов (напряжений) могут быть не только вычислены, но и измерены при помощи специальных электрических измерительных схем, называемых фильтрами симметричных составляющих. Эти фильтры получили широкое применение в релейной защите электроэнергетических установок.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Что такое фазные и линейные напряжения, токи?
2. К чему может привести обрыв нулевого провода в трехфазных цепях?
3. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями симметричной системы, соединенной треугольником?
4. В чем отличия четырехпроводной и трехпроводной цепей при аварийном режиме?
5. Рассмотрите суть метода симметричных составляющих.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Соберите схему соединения потребителя звездой, согласно рисунку 9.8. В качестве однофазных приемников используются резисторы (активная нагрузка, $\cos \varphi = 1$), то есть *все опыты делаются для однородных симметричных приемников*.

При соединении звездой (четырёхпроводная система) делается только один опыт аварийного режима – обрыв фазы. Для этого отключаются сопротивления резистора R в одной из фаз трехфазной системы, то есть зажим (*)

на мультиметре и начало заданной фазы («a», «b» или «c») при сборке схемы (рис. 9.8) не соединяются.

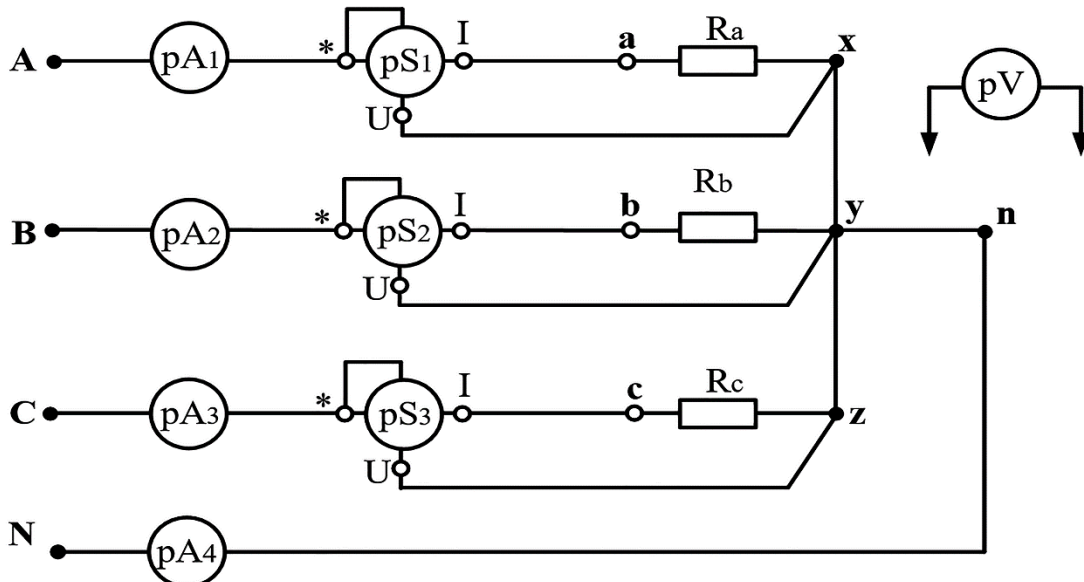


Рисунок 9.8 – Электрическая схема экспериментальной цепи

2. Произведите измерения фазных и линейных значений токов и напряжений в четырехпроводной сети (с нейтральным проводом) при обрыве фазы (табл. 9.1.). Фаза для обрыва задается преподавателем.

Таблица 9.1 – Соединение звездой (четырепроводная система)

Вид нагрузки	Измеряемые величины									
	$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$U_a,$ В	$U_b,$ В	$U_c,$ В	$I_a,$ А	$I_b,$ А	$I_c,$ А	$I_N,$ А
Обрыв фазы										

3. Отключите нейтральный провод (трехпроводная система). Исследования проведите в соответствии с таблицей 9.2:

1) обрыв фазы (фаза задается преподавателем) – отключаются сопротивления резистора R в одной из фаз трехфазной системы, то есть начало заданной фазы («a», «b» или «c») при сборке схемы (рис. 9.8) не соединяются;

2) короткое замыкание фазы (фаза задается преподавателем) – необходимо начало фазы соединить проводом с концом той же фазы ((*) соединить с одноименным концом фазы «х»; «у» или «z»).

Таблица 9.2 – Соединение звездой (трехпроводная система)

Вид нагрузки	Измеряемые величины									
	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$U_a,$ B	$U_b,$ B	$U_c,$ B	$U_{Nn},$ A	$I_a,$ A	$I_b,$ A	$I_c,$ A
Обрыв фазы										
Короткое замыкание фазы										

4. Соберите схему соединения потребителя треугольником, согласно рисунку 9.9.

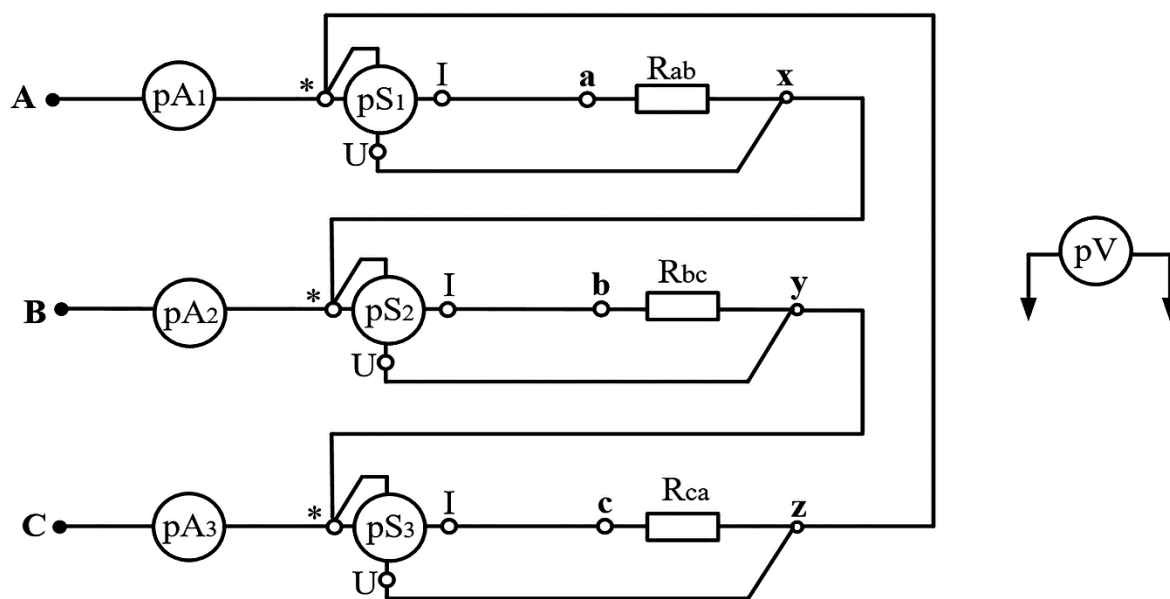


Рисунок 9.9 – Электрическая схема экспериментальной цепи

5. При соединении потребителя треугольником делается два опыта:

1) обрыв фазы (фаза задается преподавателем) – отключаются сопротивления резистора R в одной из фаз трехфазной системы, начало заданной фазы («a», «b» или «c») при сборке схемы (рис. 9.9) не соединяются;

2) обрыв линейного провода – выполняется отключение одного из линейных проводов, при равномерной нагрузке (необходимо убедиться, что ток в этом линейном проводе равен нулю).

6. Проведите указанные исследования, измеренные величины запишите в таблицу 9.3.

Таблица 9.3 – Соединение потребителя треугольником

Вид нагрузки	Измеряемые величины								
	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$I_{ab},$ A	$I_{bc},$ A	$I_{ca},$ A	$I_a,$ A	$I_b,$ A	$I_c,$ A
Обрыв фазы									
Обрыв линейного провода									

7. Постройте векторные диаграммы токов и напряжений для каждого случая (табл. 9.1, 9.2, 9.3) (пять диаграмм).

Контрольные вопросы

1. Каково соотношение между линейными и фазными напряжениями при обрыве линейного провода в трехфазной системе, соединенной звездой?
2. Каково соотношение между линейными и фазными токами при обрыве линейного провода в трехфазной системе, соединенной треугольником?
3. Как влияет характер и величина нагрузки на ток в нейтральном проводе при обрыве фазы при соединении звездой?
4. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями, соединенной звездой, при обрыве фазы «а», «b» или «с»?
5. Почему опасно короткое замыкание фазы приемника в четырехпроводной системе?
6. Как строится прямая последовательность в методе симметричных составляющих?
7. Как строится обратная последовательность в методе симметричных составляющих?
8. Чем отличается и как строится нулевая последовательность в методе симметричных составляющих?

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ТРЕХФАЗНЫМ ЦЕПЯМ

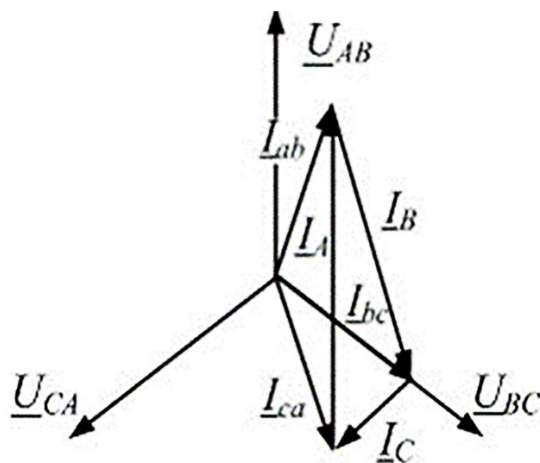
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. В четырехпроводной трехфазной цепи нейтральный провод обеспечивает симметрию ... несимметричного приемника:

- 1) фазных напряжений;
- 2) линейных напряжений;
- 3) фазных токов.

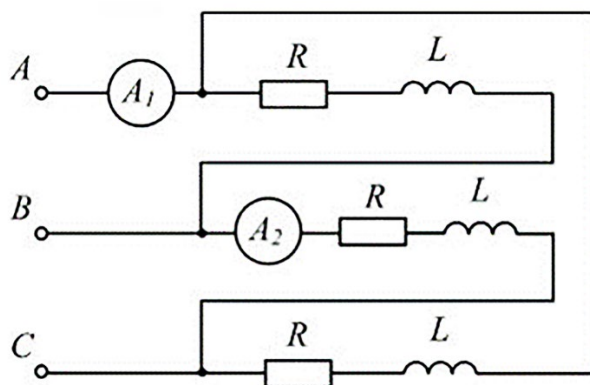
2. Векторная диаграмма напряжений и токов соответствует трехфазной цепи при соединении фаз:

- 1) несимметричного приемника треугольником;
- 2) несимметричного приемника звездой;
- 3) симметричного приемника треугольником;
- 4) симметричного приемника звездой.



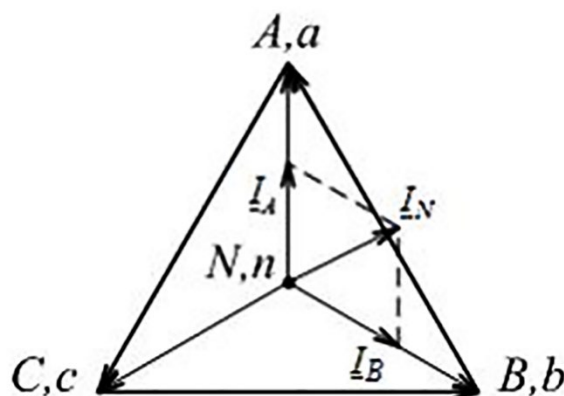
3. Если в симметричной трехфазной цепи амперметр A_1 показал 10 А, то показание амперметра A_2 равно:

- 1) 5,8 А;
- 2) 17,3 А;
- 3) 10 А;
- 4) 3 А.



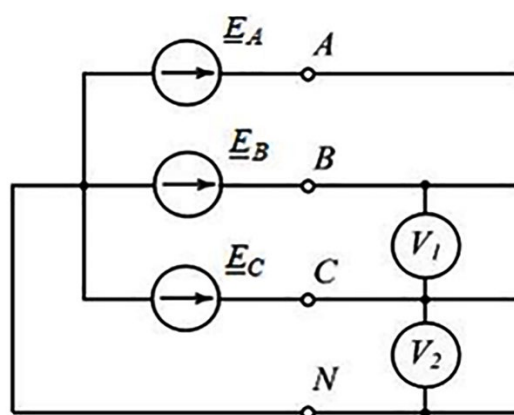
4. Чему равно отношение напряжений U_1/U_2 (рисунок), измеряемых вольтметрами V_1 и V_2 ?

- 1) 1;
- 2) $1/\sqrt{3}$;
- 3) $\sqrt{3}$;
- 4) 3.



5. На рисунке приведена векторная диаграмма трехфазной цепи. Укажите неверное утверждение:

- 1) нагрузка фаз симметричная;
- 2) нагрузка фаз А и В активная;
- 3) сопротивления фаз А и В равны;
- 4) нагрузка в фазе С отключена.

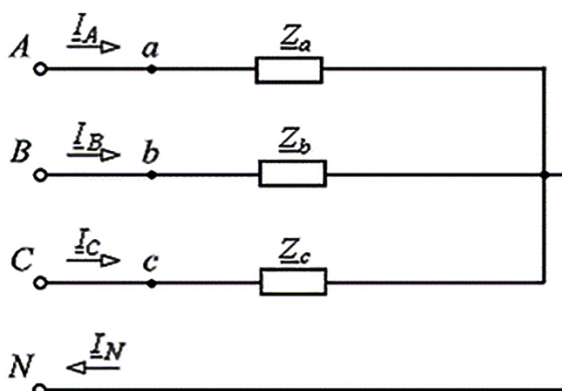


6. При значениях токов

$$\dot{I}_A = 3 \cdot e^{j0^\circ} \text{ A}, \quad \dot{I}_A = 3 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ A},$$

$\dot{I}_A = 3 \cdot e^{j120^\circ} \text{ A}$. Чему равен ток в нейтральном проводе равен?

- 1) 3 А;
- 2) 6 А;
- 3) 9 А;
- 4) 12 А.



7. В трехфазную сеть с линейным напряжением $U_\Delta = 380 \text{ В}$ включены треугольником симметричные приемники с сопротивлением $\underline{Z} = 38 e^{j60^\circ}$. Чему равна потребляемая активная мощность?

- 1) 5,7 кВт;
- 2) 3,8 кВт;

3) 11,4 кВт;

4) 1,9 кВт.

8. Фазное напряжение 220 В, фазный ток 5 А. Нагрузка симметричная. Коэффициент мощности 0,8. Чему равна активная мощность трехфазного потребителя электрической энергии?

1) $P = 880$ Вт; 2) $P = 32,5$ Вт;

3) $P = 1\,100$ Вт; 4) $P = 2\,640$ Вт.

9. Каковы соотношения линейных и фазных напряжений при соединении потребителя звездой?

1) $U_a = U_{ab}$; $U_b = U_{bc}$; $U_c = U_{ca}$;

2) $U_a = \sqrt{3} \cdot U_{ab}$; $U_b = \sqrt{3} \cdot U_{bc}$; $U_c = \sqrt{3} \cdot U_{ca}$;

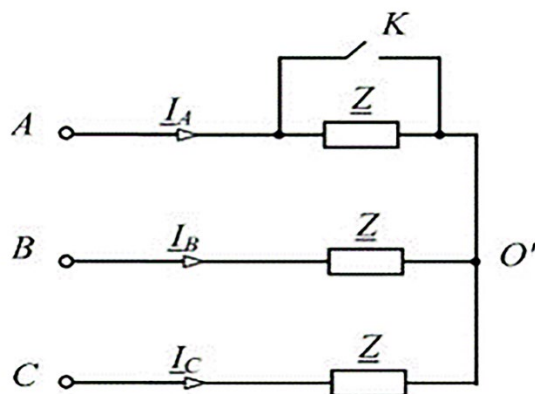
3) $\sqrt{3} \cdot U_a = U_{ab}$; $\sqrt{3} \cdot U_b = U_{bc}$; $\sqrt{3} \cdot U_c = U_{ca}$.

10. В симметричной трехфазной цепи после замыкания ключа K ток I_A :

1) не изменится;

2) увеличится в три раза;

3) увеличится в $\sqrt{3}$ раз.



СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

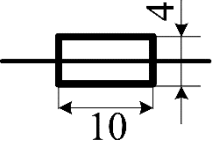
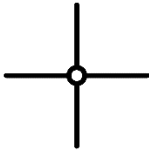
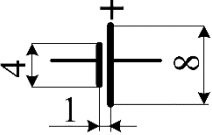
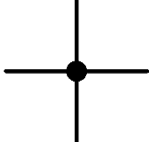
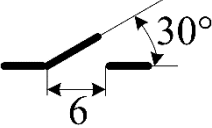
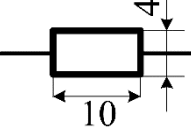
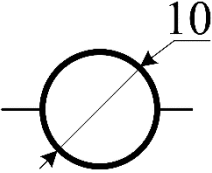
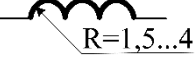
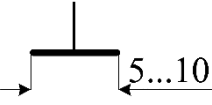
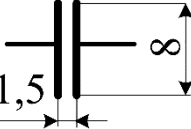
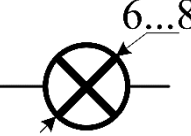
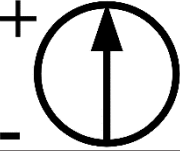
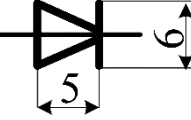
1. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи : учебное пособие / Г. И. Атабеков. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 592 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники : учебник. Т. 1. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – Москва : Юрайт, 2020. – 831 с.
3. Горбунова, Л. Н. Теоретические основы электротехники : учебное пособие / Л. Н. Горбунова, С. А. Гусева. – Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2015. – 116 с. // Электронная библиотека ДальГАУ : [сайт]. – URL: https://irbis.dalgau.ru/DigitalLibrary/UMM_vo/55.pdf.
4. Мельников, А. С. Теоретические основы электротехники : учебное пособие. Ч. 1 / А. С. Мельников. – Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2009. – 154 с.
5. Мельников, А. С. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебное пособие / А. С. Мельников. – Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2011. – 460 с.
6. Теоретические основы электротехники. Сборник задач : учебное пособие / под ред. Л. А. Бессонова. – Москва : Юрайт, 2019. – 527 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

УСЛОВНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

ЧАСТО ПРИМЕНЯЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Таблица А.1 – Условные изображения наиболее часто применяемых элементов электрической цепи

Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение	
	графическое	буквенное		графическое	буквенное
Предохранитель плавкий		FU	Соединение разъёмное		—
Гальванический элемент		GB	Соединение неразъёмное		—
Выключатель			Резистор		R
Прибор измерительный		PA, PV, PS	Катушка индуктивности		L или XL
Корпус		—	Конденсатор емкости		C или XC
Лабораторный автотрансформатор		ATV	Лампа		HL
Источник ЭДС		E	Диод полупроводниковый		—

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НА ШКАЛАХ ПРИБОРОВ

Таблица Б.1 – Обозначения единиц, их кратных и дольных значений

Символ по МЭЕ-51	Наименование	Условное обозначение
A-2	ампер	A
A-3	миллиампер	mA
A-4	микроампер	μ A
A-5	киловольт	kV
A-6	вольт	V
A-7	милливольт	mV
A-8	микровольт	μ V
A-11	ватт	W
A-17	герц	Hz
A-18	мегаом	M Ω
A-19	килоом	k Ω
A-20	ом	Ω
A-22	тесла	T
–	вебер	Wb
–	фарада	F
–	генри	H
–	коэффициент мощности	cos φ
–	градус угла сдвига фаз	φ

Таблица Б.2 – Обозначения рода тока

Символ по МЭЕ-51	Наименование	Условное обозначение
B-1	постоянный ток	–
B-2	переменный (однофазный) ток	~
B-3	постоянный и переменный ток	$\overline{\sim}$
B-4	трехфазный ток (общее обозначение)	$\approx$

Таблица Б.3 – Обозначения прочности изоляции и положения прибора

Символ по МЭЕ-51	Наименование	Условное обозначение
C-1	измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением в 500 В	
C-2	измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, которое превышает 500 В (например, 2 киловольт)	

Продолжение таблицы Б.3

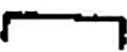
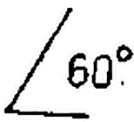
Символ по МЭЕ-51	Наименование	Условное обозначение
С-3	прибор испытанию прочности не подлежит	
С-7	прибор или его вспомогательная часть под высоким напряжением	
Д-1	прибор применять при вертикальном положении шкалы	
Д-2	прибор применять при горизонтальном положении шкалы	
Д-3	прибор применять при наклонном положении шкалы (например, под углом 60°) относительно горизонтальной плоскости	

Таблица Б.4 – Обозначения принципа действия прибора

Наименование	Условное обозначение
Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой	
Электромагнитный прибор	
Электродинамический прибор	
Ферродинамический прибор	
Тепловой прибор с нагреваемой проволокой	
Электростатический прибор	
Вибрационный прибор	

Продолжение таблицы Б.4

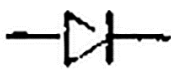
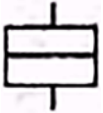
Наименование	Условное обозначение
Выпрямитель	
Шунт	
Дополнительное сопротивление	
Внимание! Смотри дополнительные указания в паспорте и инструкции по эксплуатации	
Общая вспомогательная часть	

Таблица Б.5 – Системы электроизмерительных приборов

Наименование системы	Условные обозначения		Род тока для приборов данной системы	Использование данной системы	Эксплуатационные особенности приборов
	с механическим противодействующим моментом	без противодействующего момента			
Магнитоэлектрическая с подвижной рамкой			постоянный	гальванометры, амперметры, вольтметры, мегомметры, регистрирующие приборы	самая чувствительная из всех систем; самые точные приборы постоянного тока; шкала равномерная, мало чувствительная к внешним магнитным полям
Электромагнитная			постоянный, переменный	щитовые амперметры, вольтметры, фазометры, частотомеры; переносные амперметры, вольтметры, фазометры, синхроскопы	шкалы амперметров, вольтметров неравномерны; относительно низкая чувствительность; рабочая часть шкалы начинается от 15–20 % шкалы; обладают большой перегрузочной способностью; самые прочные дешевые приборы

Продолжение таблицы Б.5

Наименование системы	Условные обозначения		Род тока для приборов данной системы	Использование данной системы	Эксплуатационные особенности приборов
	с механическим противодействующим моментом	без противодействующего момента			
Электродинамическая			постоянный, переменный	амперметры, вольтметры, ваттметры, фазометры, счетчики в цепях постоянного тока	самые точные из приборов переменного тока; чувствительны к влиянию внешних магнитных полей; шкала амперметров и вольтметров неравномерная; рабочая часть шкалы этих приборов начинается с 10–15 % шкалы; значительное собственное потребление энергии
Ферродинамическая			постоянный, переменный	амперметры, вольтметры, ваттметры, фазометры, частотомеры	относительно низкая точность; обладают большим вращающим моментом; чувствительны к колебаниям частоты; высокое собственное потребление энергии
Индукционная			переменный	счетчики электрической энергии	чувствительны к колебаниям частоты
Электростатическая		—	постоянный, переменный	вольтметры и киловольтметры	слабая чувствительность; внутреннее сопротивление постоянному току, а переменному достигает больших значений; собственное потребление энергии равно нулю

Учебное издание

*Горбунова Людмила Николаевна,
кандидат сельскохозяйственных наук*

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
ЧАСТЬ 1**

Лабораторный практикум

Подписано в печать 29.12.2023 г.
Формат 60х90/16. Уч.-изд. л – 3,70. Усл. печ. л. – 7,65.
Тираж по требованию. Заказ 65.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет»

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии
Дальневосточного государственного
аграрного университета
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86

