

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Витебский государственный
университет имени П.М. Машерова»
Кафедра инженерной физики

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

*Рабочая тетрадь
для выполнения лабораторных работ*

*Витебск
ВГУ имени П.М. Машерова
2022*

УДК 537.3(076.5)
ББК 22.332я73
Э45

Печатается по решению научно-методического совета учреждения образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова». Протокол № 2 от 05.01.2022.

Составители: старшие преподаватели кафедры инженерной физики ВГУ имени П.М. Машерова **Т.И. Сапелко, Ю.В. Шиёнок**

Р е ц е н з е н т :
заведующий кафедрой прикладного и системного программирования
ВГУ имени П.М. Машерова, кандидат физико-математических наук,
доцент *С.А. Ермоченко*

Э45 **Электрические цепи и сигналы : рабочая тетрадь для выполнения лабораторных работ / сост.: Т.И. Сапелко, Ю.В. Шиёнок. – Витебск : ВГУ имени П.М. Машерова, 2022. – 46 с.**

Рабочая тетрадь для выполнения лабораторных работ студентами факультета математики и информационных технологий подготовлена в соответствии с учебной программой для специальности 1-98 01 01-02 Компьютерная безопасность. Содержит теорию, методику выполнения, контрольные вопросы для защиты лабораторных работ. Учебное издание предназначено для освоения теоретического материала и отработки практических навыков при изучении дисциплины «Электрические цепи и сигналы».

УДК 537.3(076.5)
ББК 22.332я73

© ВГУ имени П.М. Машерова, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	5
Лабораторная работа № 1. Последовательное соединение приемников однофазного переменного тока	7
Лабораторная работа № 2. Резонанс напряжений	21
Лабораторная работа № 3. Однофазная цепь с параллельным соедине- нием элементов. Резонанс токов	27
Лабораторная работа № 4. Соединение трехфазной цепи «звездой»	36

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные занятия по курсу «Электрические цепи и сигналы» являются важнейшим элементом учебного процесса в плане приобретения студентами навыков в планировании эксперимента, использования измерительных приборов и аппаратуры, в экспериментальном исследовании схем, устройств и электронных элементов, а также в усвоении и практической конкретизации лекционного материала.

В рабочую тетрадь входят лабораторные работы по всем разделам дисциплины «Электрические цепи и сигналы». Для каждой лабораторной работы сформулированы цель исследований, дан перечень необходимых приборов и оборудования, определены конкретные задания и порядок выполнения работы, а также приведены контрольные вопросы и указан объем отчетных материалов. Краткое изложение теоретических сведений по исследуемому вопросу поможет студентам в подготовке к лабораторным работам и их выполнению.

Особенность данного издания в том, что лабораторные работы имеют учебно-исследовательский характер. Они развивают у студентов навыки проведения экспериментальных исследований, знакомят с методами исследований процессов в электрических цепях и техникой измерения их параметров, обращения с электротехническими устройствами и электроизмерительной аппаратурой.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Организация проведения лабораторных работ

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Каждый студент должен четко понимать цель лабораторной работы и отчетливо представлять назначение, принцип работы и основные характеристики исследуемой схемы, устройства или прибора. Поэтому перед выполнением каждой работы необходима предварительная подготовка, в процессе которой студент повторяет пройденный теоретический материал, готовит таблицы наблюдений и изучает последовательность необходимых операций.

После проверки степени готовности студента к выполнению лабораторной работы он допускается к сборке схемы, указанной в задании.

После проверки собранной схемы преподавателем студенты приступают к выполнению лабораторной работы. Работа считается законченной в том случае, если результаты в виде записей, таблиц представлены преподавателю, им проверены и утверждены, после чего студенты разбирают схему и приводят рабочее место в исходное состояние.

2. Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ

При выполнении лабораторных работ студенты должны помнить о возможности поражения электрическим током и соблюдать следующие правила техники безопасности:

1. К проведению лабораторных работ допускаются только студенты, знающие правила техники безопасности. Инструктаж по технике безопасности проводит преподаватель, что фиксируется в специальном журнале по ТБ.

2. При проведении работ запрещается громко разговаривать, отвлекать работающих за рабочим местом.

3. Перед началом сборки схемы измерений необходимо убедиться в том, что выключатели находятся в положении **«Выключено»**.

4. При монтаже схем используются только изолированные провода. Пользоваться оголенными проводами или с поврежденной изоляцией запрещается.

5. При сборке схемы следует обратить внимание на высокую надежность контактов всех разъемных соединений и по возможности не допускать пересечения проводов.

6. Студенту категорически запрещается включать схему без проверки ее преподавателем.

7. Напряжение к рабочему месту подается только преподавателем.

8. Устранение замеченных в рабочей цепи неисправностей, а также все пересоединения, необходимые по ходу работы, производятся только при отключенном напряжении. Повторное включение схемы после этих пересоединений допускается только после разрешения преподавателя.

9. Во время работы запрещается прикасаться к оголенным частям электрической цепи.

10. Запрещается покидать рабочее место и оставлять без наблюдения включенную лабораторную установку.

11. При возникновении неисправностей в работе лабораторного оборудования или несчастного случая лабораторную установку следует немедленно обесточить, оказать пострадавшему первую медицинскую помощь и немедленно доложить преподавателю.

12. По окончании работы напряжение у рабочего места необходимо немедленно отключить.

13. Не следует загромождать свое рабочее место вещами, не относящимися к данной работе.

14. Запрещается во время работы загромождать подходы стульями, скамейками и т.п.

Лабораторная работа № 1

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально исследовать работу электрической цепи однофазного синусоидального тока с последовательным соединением активных и реактивных приемников:

1. исследовать работу цепи переменного тока при различных типах нагрузки и разных режимах работы;
2. научиться определять параметры электрической цепи переменного тока;
3. построить векторные диаграммы при последовательном соединении активных и реактивных элементов цепи переменного тока, а также треугольники сопротивлений и мощностей.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цепь переменного тока с активным сопротивлением R

Простейшей цепью переменного тока является цепь, имеющая только сопротивление R . Сопротивление в цепи переменного тока и в цепи постоянного тока ведет себя по-разному.

Переменный ток хуже проходит через сопротивление, чем постоянный. Это объясняется следующими причинами:

- 1) поверхностный эффект;
- 2) вихревые токи;
- 3) перемagnичивание ферромагнитных материалов;
- 4) изменение поляризации диэлектриков.

Все эти явления связаны с выделением тепла, и, значит, переменный электрический ток затрачивает дополнительную энергию. Постоянный ток ни одного из этих явлений не вызывает, поэтому не требует дополнительных затрат энергии.

Сопротивление постоянному току называют омическим. Сопротивление переменному току называют активным. На активном сопротивлении, так же как и на омическом, происходит выделение тепла, пропорциональное выделенной электрической энергии. Разница между омическим и активным сопротивлением тем больше, чем больше частота переменного тока. Нормированное сопротивление резистора соответствует постоянному току.

Активными сопротивлениями в цепях переменного тока являются нагревательные и осветительные приборы, а так же, как активные сопротивления, проявляют себя все устройства, на которых выделяется полезная мощность в любом виде.

Если через активное сопротивление R протекает переменный синусоидальный ток, то на нем действует переменное синусоидальное напряжение. Ток и напряжение имеют одинаковую частоту и совпадают по фазе, поэтому на активном сопротивлении нет сдвига фаз между напряжением и током: $\varphi_R = 0$.

Цепь переменного тока с индуктивностью L и емкостью C .

Индуктивность и емкость проявляют себя в электрических цепях переменного тока как сопротивления.

Катушка индуктивности оказывает переменному току сопротивление, которое называют реактивным сопротивлением индуктивности или индуктивным сопротивлением – X_L . При наличии в цепи одного индуктивного сопротивления сдвиг фаз между напряжением и током $\varphi_L = +90^\circ$. При этом

$$X_L = \omega L = 2\pi fL. \quad (1.1)$$

Формула $X_L = \omega L$ показывает, что сопротивление индуктивности переменному току зависит от частоты. Это означает, что индуктивность по-разному пропускает ток низкой и ток высокой частоты.

Индуктивность не пропускает переменный ток высокой частоты (хуже пропускает). Чем больше частота, тем труднее проходит переменный ток. Катушка индуктивности используется для ограничения протекания переменного тока.

Конденсатор в электрической цепи переменного тока оказывает сопротивление переменному току, которое называется реактивным сопротивлением емкости, или проще емкостным сопротивлением X_C

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}. \quad (1.2)$$

Сдвиг фаз в цепи с емкостью $\varphi_C = -90^\circ$.

Формула $X_C = 1/\omega C$ показывает, что сопротивление емкости переменному току зависит от частоты ω . Это означает, что емкость по-разному пропускает ток низкой и высокой частоты.

Емкость пропускает переменный ток тем лучше, чем выше частота. Емкость вообще не пропускает постоянный ток, и это ее важнейшее свойство. Одно из применений конденсатора состоит в том, что его ставят в те ветви схем, где запрещено протекание постоянного тока.

Электрические цепи переменного тока

Реальные электрические цепи переменного тока содержат сопротивление R , индуктивность L и емкость C .

Особенностью цепей переменного тока является наличие в них сдвига фаз φ между напряжением и током. Это связано с наличием в электрической цепи реактивных сопротивлений X_L и X_C , что во многом осложняет расчет этих цепей обычными алгебраическими методами. В связи с этим для анализа цепей переменного тока широко используют графические ме-

тоды с изображением напряжения и тока векторами, т.е. отрезками прямых, имеющих не только величину, но и направление. Такого рода графики называются векторными диаграммами, а сам расчет – методом векторных диаграмм.

Последовательное соединение R–L

Электрическую цепь, состоящую из нескольких последовательно соединенных элементов, называют неразветвленной электрической цепью, или просто последовательной электрической цепью (рис. 1.1).

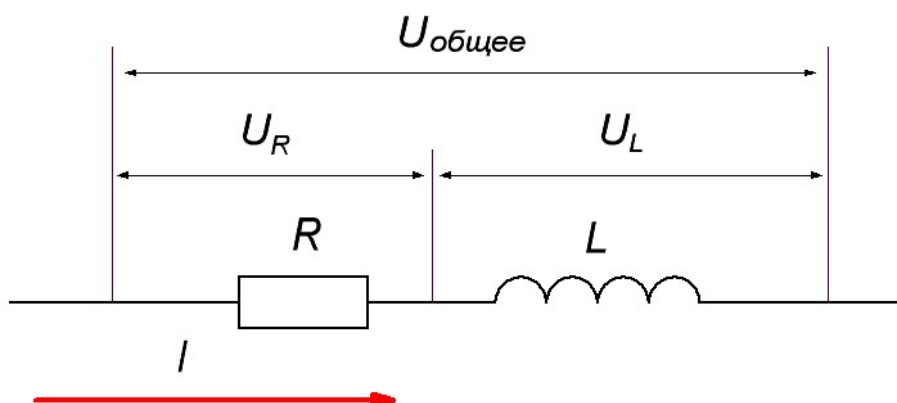


Рис. 1.1. Последовательная R–L цепь переменного тока

Особенностью такой цепи является то, что через все элементы цепи независимо от их количества и характера сопротивлений протекает одинаковый общий ток. Общее напряжение питающей цепи равно не просто сумме напряжений на каждом сопротивлении, оно равно векторной сумме, т.е. вектор общего напряжения равен сумме векторов напряжений на каждом участке цепи. При этом вектор напряжения на активном сопротивлении совпадает по направлению с вектором тока, а векторы напряжения на реактивных сопротивлениях образуют с вектором тока угол сдвига фазы φ между током и напряжением. Для расчетов напряжений надо построить векторную диаграмму напряжений.

Треугольник напряжений для расчета R–L цепи

Векторная диаграмма напряжений представляет собой векторный треугольник напряжений.

Для последовательного соединения полное напряжение цепи складывается из напряжений на элементах цепи. Значит, вектор суммарного напряжения U равен сумме напряжений на элементах цепи: вектору напряжения на сопротивлении U_R и вектору напряжения на катушке индуктивности U_L .

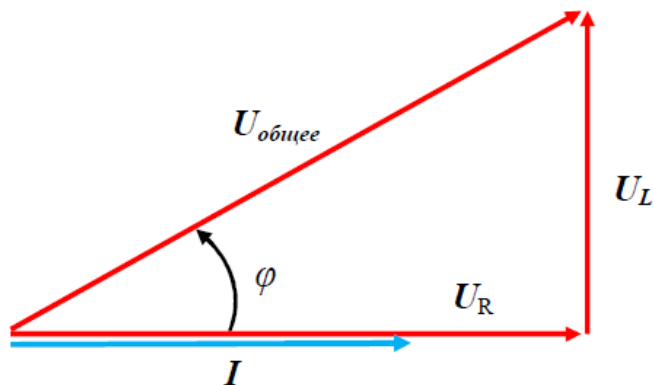


Рис. 1.2. Векторная диаграмма R–L цепи

Векторная диаграмма строится, как показано на рис. 1.2.

1. Вектор тока I изобразим как горизонтальный вектор слева направо.
 2. Откладываем вектор напряжения на активном сопротивлении U_R . Этот вектор направлен горизонтально, т.к. сдвиг фаз на активном сопротивлении равен нулю: $\varphi_R = 0$.

3. Строим вектор напряжения на катушке индуктивности U_L . Его надо откладывать под углом 90° , т.к. напряжение на катушке опережает ток на 90° : $\varphi_L = +90^\circ$.

4. Построим вектор полного напряжения U на этих элементах цепи. Это вектор суммы, а он строится из начала первого вектора к концу второго.

Получился прямоугольный треугольник. Любую сторону этого треугольника можно найти по теореме Пифагора. Острый угол этого треугольника – это сдвиг фаз φ в этой цепи между током и общим напряжением.

Треугольник сопротивлений

Ток при последовательном соединении является общим для всех сопротивлений цепи.

Треугольник напряжений позволяет построить треугольник сопротивлений. Для этого каждую сторону треугольника напряжений надо разделить на ток.

Полученный треугольник будет подобен треугольнику напряжений. Этот треугольник получается не векторный, а его стороны соответствуют сопротивлениям цепи.

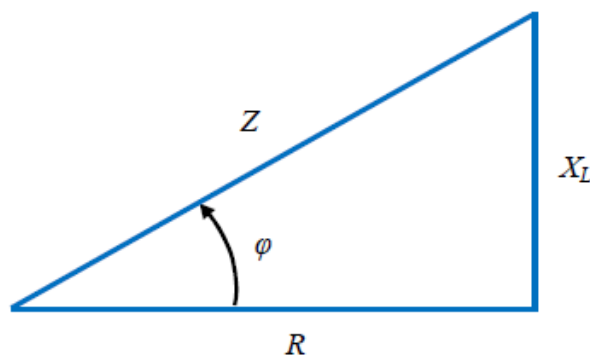


Рис. 1.3. Треугольник сопротивлений R–L цепи

На рис. 1.3 показано построение треугольника сопротивлений для цепи, имеющей активное сопротивление R и индуктивное сопротивление X_L .

По теореме Пифагора из треугольника сопротивлений находим

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}. \quad (1.3)$$

Из любого треугольника можно определить сдвиг фаз φ между напряжением и током. Действительно, по правилам тригонометрии тангенс угла прямоугольного треугольника равен частному от деления катета, противолежащего углу, на другой катет, т.е. в данном случае частному X_L/R , а это соотношение, как известно, определяет собой $\operatorname{tg}\varphi$. Зная тангенс угла, мы можем определить угол сдвига фаз φ .

Треугольник мощностей

Если каждую сторону треугольника напряжений умножить на один и тот же ток, то получится подобный треугольник, стороны которого пропорциональны мощности (рис. 1.4).

Это значит, что расчет мощностей для переменного тока производится также геометрически, потому что необходимо учитывать сдвиг фаз между напряжением и током.

Из треугольника мощностей следует, что в цепях переменного тока различают три вида мощности: активную, реактивную и полную.

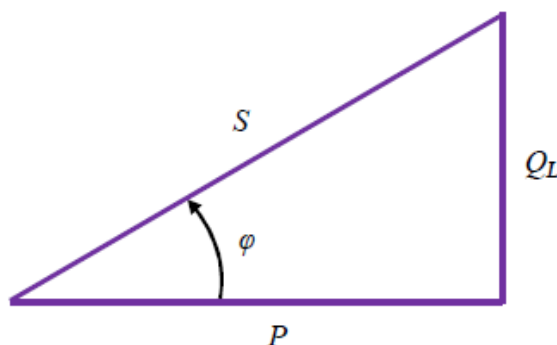


Рис. 1.4. Треугольник мощностей R–L цепи

Активная мощность P равна произведению напряжения на активную составляющую тока:

$$P = U_R \cdot I = U \cdot I \cdot \cos\varphi = U \cdot I_a. \quad (1.4)$$

Активная мощность расходуется на выполнение приемником полезной работы или выделяется в виде тепла на сопротивлении R .

Реактивная мощность Q равна произведению напряжения на реактивную составляющую тока:

$$Q = U_L \cdot I = U \cdot I \cdot \sin\varphi = U \cdot I_p. \quad (1.5)$$

Реактивная мощность выделяется на индуктивности и полезной работы не создает.

Полная мощность S определяется как геометрическая сумма активной и реактивной мощностей и равна

$$S = U \cdot I. \quad (1.6)$$

Полная мощность – это та мощность, которую источник вынужден отдавать цепи. Источник отдает полную мощность, которая больше полезной мощности из-за того, что цепь обладает индуктивностью.

Последовательное соединение R–C

Конденсаторы часто включают последовательно с сопротивлениями, но если даже специального сопротивления нет, любой конденсатор обладает определенной величиной активного сопротивления, которую необходимо учитывать (рис. 1.5).

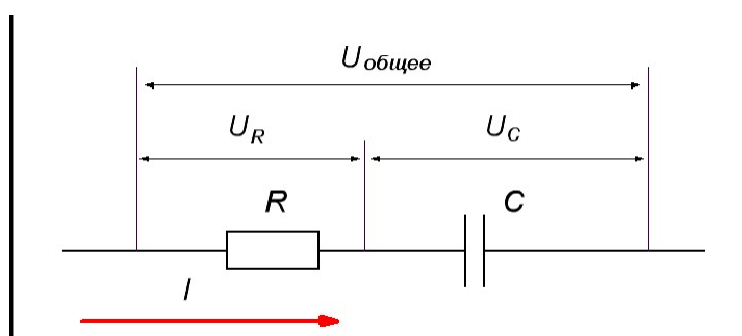


Рис. 1.5. Последовательная R–C цепь переменного тока

Векторная диаграмма напряжений представляет собой прямоугольный треугольник, который позволяет определить все составляющие по теореме Пифагора.

Соотношение сопротивлений в такой цепи соответствует треугольнику сопротивлений. Для цепи, состоящей из активного сопротивления и емкости полное сопротивление равно

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}. \quad (1.7)$$

Соотношение мощностей такой цепи соответствует треугольнику мощностей. Все треугольники подобные, значит, угол φ (сдвиг фаз) является общим для всех треугольников.

Активное сопротивление R , включенное в цепь с катушкой или конденсатором, уменьшает угол сдвига фаз.

Экспериментальное определение параметров цепи

Измерение активной, реактивной, полной мощностей и $\cos\varphi$, а также параметров цепи, например R и L , можно произвести с помощью ваттметра, амперметра и вольтметра, включенных в цепь по схеме, изображенной на рис. 1.6.

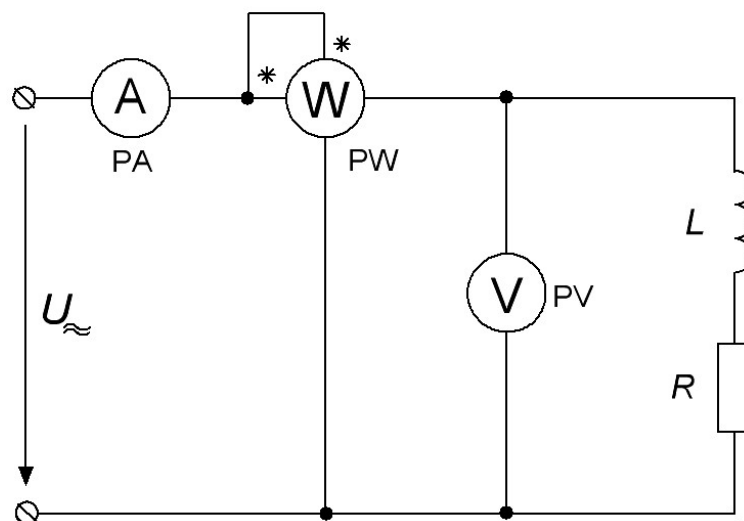


Рис. 1.6. Схема измерения основных параметров последовательной цепи переменного тока

Для цепи переменного тока закон Ома для действующих значений тока и напряжения имеет вид

$$I = \frac{U}{Z}. \quad (1.8)$$

По показаниям амперметра и вольтметра из закона Ома определяется полное сопротивление Z . По показаниям амперметра и ваттметра находится активное сопротивление цепи $R = P/I^2$. Затем можно определить реактивное сопротивление цепи

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}. \quad (1.9)$$

В случае активно–индуктивной нагрузки $X = X_L$, а в случае активно–ёмкостной цепи $X = X_C$. Зная частоту тока f , можно вычислить угловую частоту $\omega = 2\pi f$ и определить по формулам (3) или (4) индуктивность L и ёмкость C .

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследования в данной лабораторной работе является однофазные последовательные R – L и R – C электрические цепи. С помощью измерительных приборов амперметра, вольтметров и ваттметра измеряются ток в цепи, напряжения в цепи и на каждом элементе, активная мощность.

В данной работе используется реальная катушка индуктивности (дроссель с регулируемым воздушным зазором), которая представлена на рисунке 1.7 активным сопротивлением R_L и идеальной катушкой индуктивности L с индуктивным сопротивлением $X_L = \omega \cdot L$.

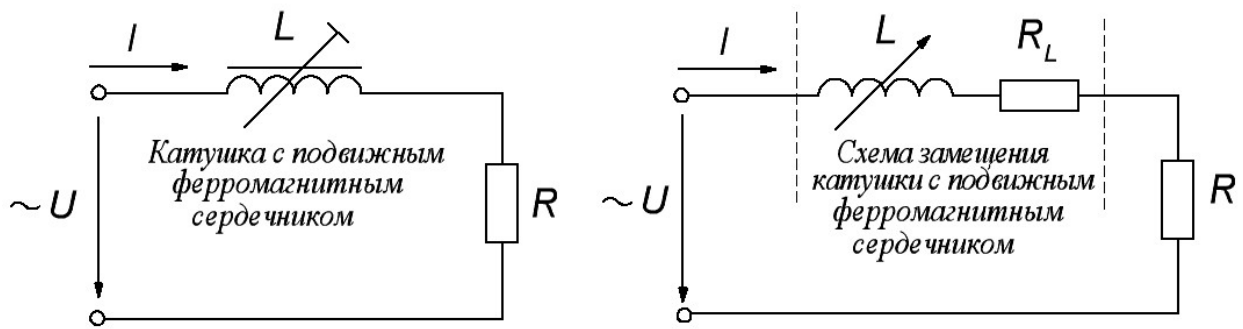


Рис. 1.7. Схема замещения дросселя с регулируемым воздушным зазором

Изменение напряжений на дросселе достигается изменением воздушного зазора в сердечнике.

По измеренным величинам необходимо рассчитать параметры элементов цепи и всей цепи переменного тока, построить векторные диаграммы и треугольники сопротивлений и мощностей.

3.2. СХЕМА ИССЛЕДУЕМОЙ R–L ЦЕПИ

На рис. 1.8 представлена электрическая схема соединения R–L с измерительными приборами.

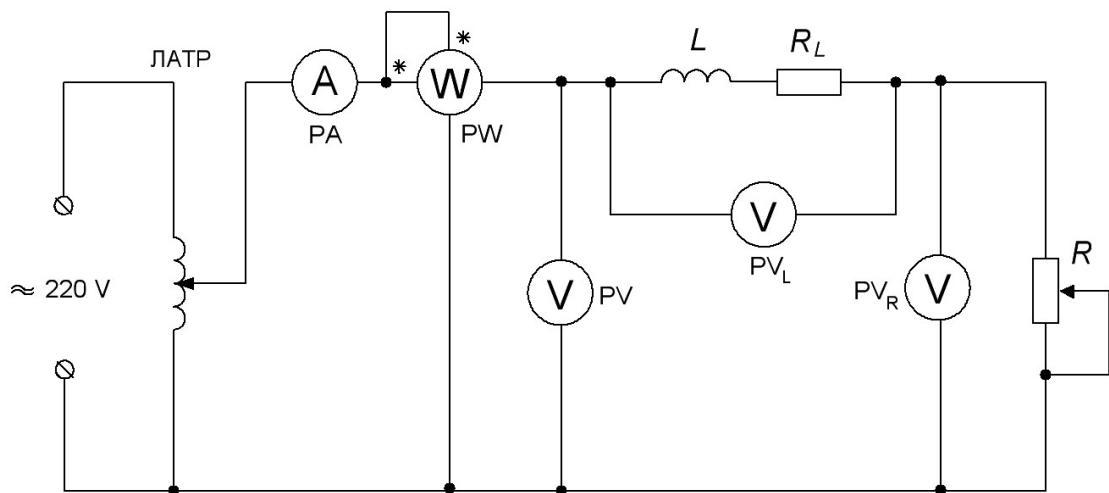


Рис. 1.8. Схема последовательной R–L цепи

Для напряжений, представленных в виде векторов, второй закон Кирхгофа имеет вид

$$U = U_L + U_R = I \cdot Z, \quad (1.10)$$

где U – приложенное напряжение сети;

Z – полное сопротивление цепи.

Падение напряжения на катушке индуктивности

$$U_L = I \cdot Z_L. \quad (1.11)$$

Падение напряжения на активном сопротивлении

$$U_R = I \cdot R. \quad (1.12)$$

Вектор напряжения на реостате U_R совпадает по фазе с вектором тока, а вектор напряжения на катушке индуктивности U_L опережает ток на угол φ_L .

По измеренным, действующим значениям тока I , мощности P , напряжений на отдельных участках U , U_R , U_L можно рассчитать параметры всей цепи и ее отдельных элементов следующим образом:

- определяем значение полного сопротивления всей цепи Z исходя из показаний приборов

$$Z = \frac{U}{I}. \quad (1.13)$$

- активное сопротивление всей цепи R_0 найдем из формулы для мощности

$$P = I^2 \cdot R_0, \quad (1.14)$$

получим

$$R_0 = \frac{P}{I^2}; \quad (1.15)$$

- активное сопротивление R определяется по показаниям амперметра I и вольтметра U_R

$$R = \frac{U_R}{I}; \quad (1.16)$$

- активное сопротивление всей цепи R_0 состоит из активного сопротивления катушки индуктивности R_L и активного сопротивления R

$$R_0 = R_L + R, \quad (1.17)$$

отсюда

$$R_L = R_0 - R; \quad (1.18)$$

- полное сопротивление катушки индуктивности Z_L

$$Z_L = \frac{U_L}{I}; \quad (1.19)$$

- из формулы для полного сопротивления Z_L

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \quad (1.20)$$

определяется реактивное сопротивление X_L

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}; \quad (1.21)$$

- индуктивность катушки L найдем из определения реактивного сопротивления индуктивности

$$X_L = \omega L = 2\pi fL, \quad (1.22)$$

отсюда

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{\sqrt{Z_L^2 - R_L^2}}{2\pi f}, \quad (1.23)$$

где $f = 50$ Гц;

- коэффициент мощности всей цепи

$$\cos\varphi = \frac{P}{U \cdot I}, \quad (1.24)$$

где угол φ показывает сдвиг фаз приложенного напряжения U к току I в цепи;

- сдвиг фаз на катушке индуктивности

$$\cos\varphi_L = \frac{R_L}{Z_L}, \quad (1.25)$$

Построение векторной диаграммы R – L цепи (рис. 1.9) проводят в следующей последовательности:

1) в выбранном масштабе строится горизонтально вектор тока I , который является общим для всех элементов цепи.

2) после этого необходимо построить в выбранном масштабе вектора напряжений U_R и U_L под заданными углами сдвига фаз $\varphi_R = 0$ и φ_L , определенной по формуле 1.1.

3) вектор приложенного к цепи напряжения U находится как геометрическая сумма этих векторов напряжений.

4) опуская перпендикуляр от конца вектора U_L на горизонтальную ось тока, графически можно найти составляющие напряжения U_L ; U_{RL} – падение напряжения, приходящееся на активное сопротивление катушки индуктивности R_L ; U_{XL} – падение напряжения, приходящееся на реактивное сопротивление X_L катушки индуктивности.

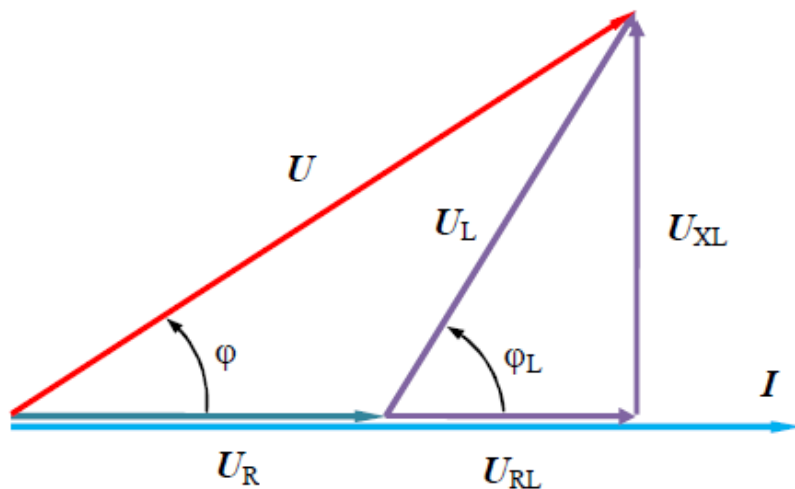


Рис. 1.9. Векторная диаграмма R – L цепи

3.3. ИССЛЕДУЕМАЯ R-C ЦЕПЬ

Схема электрической цепи представлена на рис. 1.10. Общая методика расчета в случае реального конденсатора аналогична методике расчета цепи $R-L$.

Рассмотрим случай идеального конденсатора, т.е. конденсатор как идеальный реактивный элемент. В этом случае напряжение на емкости отстает от тока по фазе на 90° .

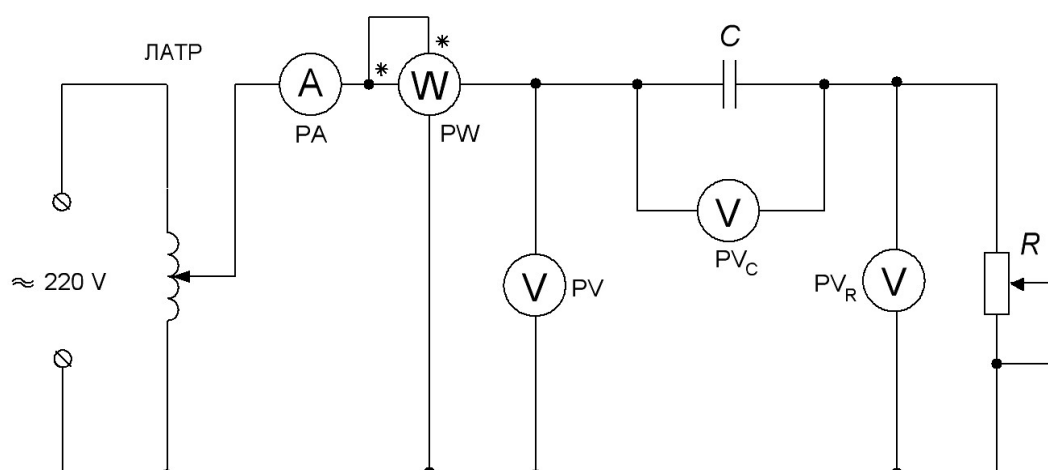


Рис. 1.10. Схема последовательной R–C цепи

По показаниям приборов можно рассчитать параметры цепи и ее отдельных элементов:

- полное сопротивление цепи

$$Z = \frac{U}{I}; \quad (1.26)$$

- активное сопротивление цепи

$$R = \frac{U_R}{I}; \quad (1.27)$$

- реактивное сопротивление емкости

$$X_C = \frac{U_C}{I_C} = \sqrt{Z^2 - R^2}; \quad (1.28)$$

- емкость конденсатора

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2\pi f X_C}, \quad (1.29)$$

где $f = 50$ Гц;

- коэффициент мощности цепи

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{P}{U \cdot I}. \quad (1.31)$$

Построение векторной диаграммы (рис. 1.11) следует начинать с вектора тока I . Затем в масштабе строятся векторы напряжений U_R и U_C с учетом сдвига фаз $\varphi_R = 0$ и $\varphi_C = -90^\circ$. Вектор приложенного к цепи напряжения U находится как геометрическая сумма векторов U_R и U_C .

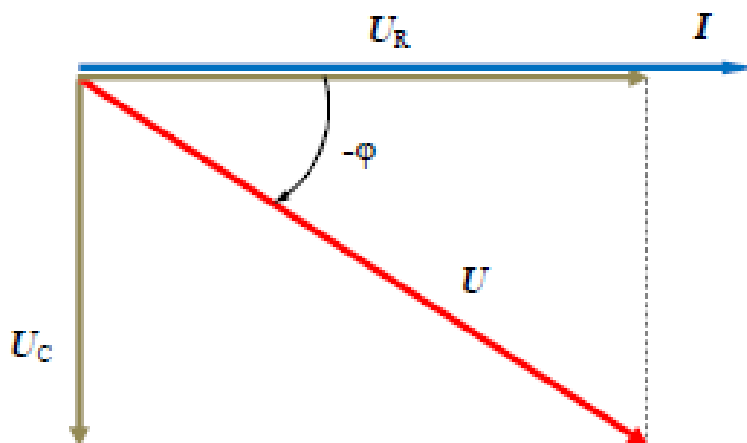


Рис. 1.11. Векторная диаграмма R–C цепи

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть, подготовить отчет и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с измерительными приборами.
3. Записать в таблицу 1.1 технические данные измерительных приборов, используемых при выполнении работы.

Таблица 1.1. – Сведения об измерительных приборах

	P_A	P_V	P_{V_L}	P_{V_C}	P_{V_R}	P_W
Наименование прибора						
Тип прибора						
Система измерительного механизма (наименование и обозначение)						
Предел измерения						
Класс точности						
Род тока						
Цена деления						
Абсолютная погрешность измерения						

4.1. ИССЛЕДОВАНИЕ R–L ЦЕПИ

1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 1.8. Установить ручку регулятора входного напряжения ЛАТР в нулевое положение (т.е. повернуть по часовой стрелке до упора). **Собранную схему предъявить для проверки преподавателю.**

2. После проверки схемы преподавателем подать напряжение на ЛАТР. Плавно вращая ручку регулятора ЛАТР против часовой стрелки, подать напряжение на собранную электрическую цепь $\approx 100 \div 150$ В.

Измерение провести для двух случаев:

а) $U_L > U_R$;

б) $U_L < U_R$.

(Изменение напряжений достигается изменением сопротивления R_L и индуктивности L дросселя в результате изменения воздушного зазора в сердечнике).

3. Измерить значения напряжений, тока и мощности и записать в таблицу 1.2.

4. По окончании измерений ручку регулятора ЛАТР повернуть до упора по часовой стрелке.

4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ R–C ЦЕПИ

1. Собрать схему по рис. 1.10. Установить ручку регулятора входного напряжения ЛАТР в нулевое положение (т.е. повернуть по часовой стрелке до упора). **Собранную схему предъявить для проверки преподавателю.**

2. После проверки схемы преподавателем подать напряжение на ЛАТР. Плавно вращая ручку регулятора ЛАТР против часовой стрелки, подать напряжение на собранную электрическую цепь $\approx 100 \div 150$ В. Измерения провести для двух случаев:

а) $U_C > U_R$;

б) $U_C < U_R$.

Указанные соотношения достигаются изменением активного сопротивления R .

3. Измеренные значения напряжений, тока и мощности записать в таблицу 1.2.

4. По окончании измерений ручку регулятора ЛАТР повернуть до упора по часовой стрелке.

5. Результаты измерений необходимо предъявить преподавателю по его указанию разобрать электрическую цепь и привести в порядок рабочее место.

Таблица 1.2. – Измеренные величины

Характер цепи		P , Вт	I , А	U_L , В	U_L , В	U_R , В	U_C , В
$R-L$	$U_R > U_L$						
	$U_R < U_L$						
$R-C$	$U_R > U_C$						
	$U_R < U_C$						

4.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По измеренным действующим значениям тока I , мощности P и напряжений на отдельных участках U_R , U_L , U_C рассчитать параметры R - L цепи по формулам (1.13–1.25) и параметры R - C цепи по формулам (1.26–1.31) и записать в таблицы 1.3 и 1.4. При числовых расчетах придерживаться следующего порядка: искомую величину выражают формулой, затем подставляют известные значения величин, записывают результат расчета (числовое значение искомой величины) и единицы измерения, промежуточные расчеты можно опускать.

Таблица 1.3. – Вычисленные параметры R - L цепи

Характер цепи		$Z, \text{Ом}$	$R_1, \text{Ом}$	$R, \text{Ом}$	$Z_L, \text{Ом}$	$R_L, \text{Ом}$	$X_L, \text{Ом}$	$L, \text{Гн}$	φ	φ_L
R - L	$U_R > U_L$									
	$U_R < U_L$									

Таблица 1.4. – Вычисленные параметры R - C цепи

Характер цепи		$Z, \text{Ом}$	$R, \text{Ом}$	$X_C, \text{Ом}$	$C, \text{Ф}$	$\cos \varphi$	φ
R - C	$U_R > U_C$						
	$U_R < U_C$						

2. Построить в масштабе векторные диаграммы для всех измерений, а также треугольники сопротивлений и мощностей для R - L и R - C цепи.

3. Оформить отчет в соответствии с методическими указаниями.

4. Ответить на контрольные вопросы и защитить выполненную лабораторную работу.

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Что такое последовательная электрическая цепь?
2. Какие виды сопротивлений существуют в цепях переменного тока?
3. Что такое сдвиг фаз?
4. Чему равны индуктивное и емкостное сопротивления, и в каких единицах их измеряют?
5. Что такое коэффициент мощности?
6. Что такое полное сопротивление цепи, и чему оно равно в случае цепи R - L , R - C .
7. Записать закон Ома для действующих значений однофазной цепи переменного тока.
8. Что такое векторная диаграмма, как она строится для последовательной однофазной цепи переменного тока?

Лабораторная работа № 2 РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально исследовать работу электрической цепи однофазного синусоидального тока с последовательным соединением катушки индуктивности и емкости. Для этого необходимо:

1. Исследовать влияния величины индуктивности катушки на электрические параметры цепи однофазного синусоидального напряжения, содержащей последовательно соединенные катушки индуктивности и конденсатор.

2. Опытным путем определить условия возникновения в данной цепи резонанса напряжения.

3. Построить векторные диаграммы и резонансные кривые при последовательном соединении катушки и конденсатора.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Резонансом в электрических цепях называется режим работы электрической цепи переменного тока, содержащей индуктивный и емкостный элементы, при котором разность фаз φ между напряжением и током равна нулю ($\varphi = 0$).

Рассмотрим последовательное соединение элементов R , L и C (рис. 2.1). Такую цепь иногда называют последовательным колебательным контуром.

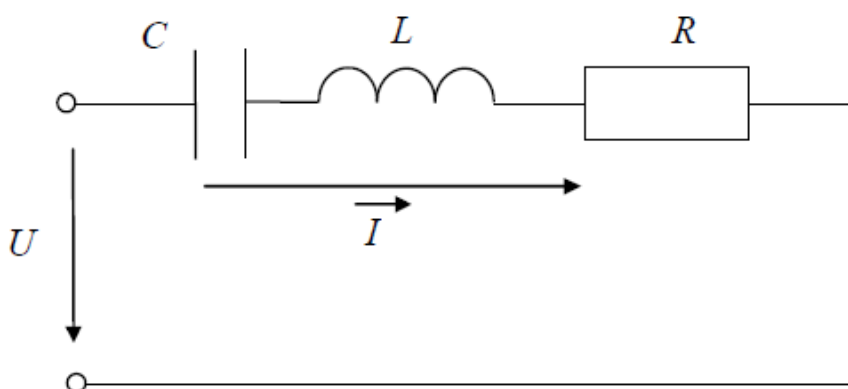


Рис. 2.1. Последовательный колебательный контур

Закон Ома для такой неразветвленной цепи имеет вид

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}. \quad (2.1)$$

Знаменатель данного выражения есть значение полного сопротивления Z , которое зависит от частоты.

При определенных условиях реактивная составляющая полного сопротивления $X = X_L - X_C$ становится равной нулю и полное сопротивление Z становится минимальным

$$Z_{\text{рез.}} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} = Z_{\text{min}} = R. \quad (2.2)$$

Ток в цепи возрастает до максимального значения

$$I_{\text{рез.}} = \frac{U}{Z} = I_{\text{max}}, \quad (2.3)$$

причем напряжение и ток совпадает по фазе ($\varphi = 0$).

Это явление в цепи с последовательным соединением RLC элементов получило название резонанса напряжений.

Условие, при котором возникает резонанс напряжений, записывается в виде

$$X_L = X_C, \text{ или } \omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (2.4)$$

где $\omega = \omega_0$ – резонансная угловая частота.

Резонансная частота ω_0 определяется из условия

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (2.5)$$

Тогда

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \text{ или } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.6)$$

Отсюда

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.7)$$

Эта формула получила название формулой Томпсона.

Если сопротивления катушки и конденсатора становятся равными при резонансе напряжений (2.4), то получается, что они полностью компенсируют друг друга. Следовательно, будут равны и падения напряжений на катушке и емкости

$$U_L = U_C. \quad (2.8)$$

Напряжение на активном сопротивлении $U_R = IR = U$, т.е. напряжение на активном сопротивлении равно полному напряжению, приложенному к цепи.

Векторная диаграмма такого случая приведена на рис. 2.2.

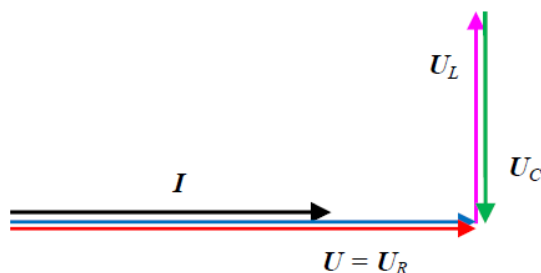


Рис. 2.2. Векторная диаграмма при резонансе напряжений

Энергетический процесс при резонансе напряжений можно рассматривать как наложение двух процессов: необратимого процесса преобразования потребляемой от источника энергии в тепло, выделяемое в активном сопротивлении цепи, и обратимого процесса, представляющего собой колебания энергии внутри цепи: между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора. Первый процесс характеризуется величиной активной мощности $P = R \cdot I^2$, а второй – величиной реактивной мощности $Q_L = X_L \cdot I^2 = X_C \cdot I^2 = Q_C$. Колебаний энергии между источником питания и участком цепи, включающим катушку и конденсатор, не происходит, и поэтому реактивная мощность всей цепи равна $Q = X \cdot I^2 = 0$.

2.2. СВОЙСТВА ЦЕПИ ПРИ РЕЗОНАНСЕ НАПРЯЖЕНИЙ

1. Общее сопротивление становится равным активному сопротивлению, а значит, становится наименьшим.
2. Ток становится наибольшим и совпадает по фазе с напряжением.
3. Угол сдвига фаз становится равным нулю и, значит, цепь приобретает чисто активный характер.
4. Напряжение на колебательном контуре, то есть на реактивных элементах L и C , становится максимальным и может многократно превышать напряжение на активном сопротивлении.

Вывод: для получения максимального напряжения на колебательном контуре его необходимо ввести в состояние резонанса.

Колебательные контуры применяются в технике связи для выбора необходимой частоты передачи и приёма сигнала. Например, радиоприёмник принимает ту радиостанцию, частота которой соответствует резонансной частоте входного колебательного контура приёмника.

Из условий возникновения резонанса (2.4) следует, что практически резонанс напряжений можно получить изменением:

- 1) если меняется ёмкость и становится равной

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}; \quad (2.9)$$

- 2) если меняется индуктивность и становится равной

$$L = \frac{1}{\omega^2 C}; \quad (2.10)$$

- 3) если одновременно меняются L и C

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}; \quad (2.11)$$

- 4) если меняется частота сети (частота вынужденных колебаний)

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.12)$$

2.3. ДОБРОТНОСТЬ КОНТУРА

Во сколько раз напряжение на катушке и конденсаторе может превышать напряжение на активном сопротивлении при резонансе? Для оценки контура при резонансе вводится специальное понятие – добротность

контура. Кроме того, добротность контура – параметр, показывающий, как долго в контуре могут сохраняться собственные колебания.

Отношение напряжения на индуктивности или емкости к напряжению на входе в режиме резонанса называется добротностью контура

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}. \quad (2.13)$$

Чем меньше активное сопротивление, тем меньше потери, тем больше добротность контура.

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_L I}{RI} = \frac{U_L}{U}, \quad (2.14)$$

$$Q = \frac{X_C}{R} = \frac{X_C I}{RI} = \frac{U_C}{U}. \quad (2.15)$$

При $X_L \gg R$ напряжения на индуктивной катушке и конденсаторе при резонансе напряжений могут значительно превысить напряжение источника, что опасно для изоляции катушки и конденсатора. В промышленных сетях резонанс напряжений является аварийным режимом, так как увеличение напряжения может привести к пробое цепи.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной лабораторной работе исследуется цепь с последовательным соединением постоянного конденсатора и переменной индуктивности. Изменение индуктивности в катушке осуществляется в результате изменения воздушного зазора в подвижном ферромагнитном сердечнике.

На рис. 2.3. изображена LC-цепь и схема замещения этой цепи.

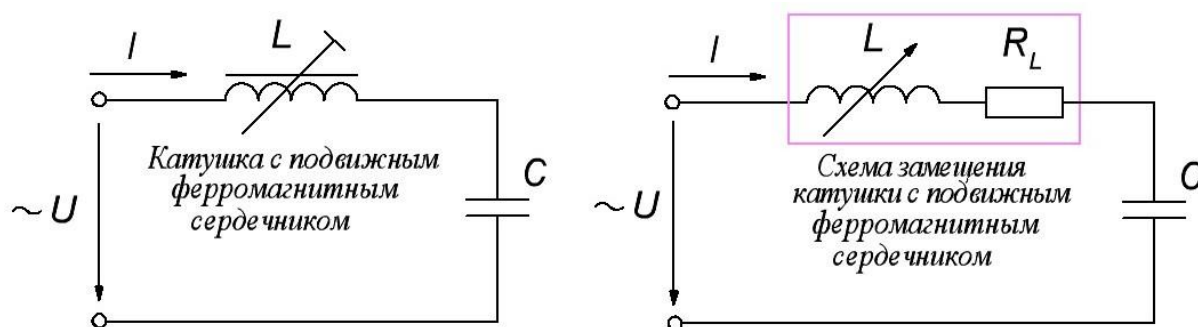


Рис. 2.3. Схема цепи с конденсатором и катушки с подвижным сердечником

Ток в такой цепи отстает по фазе от напряжения при $X_L > X_C$ и опережает по фазе напряжение при $X_L < X_C$. При равенстве индуктивного X_L и емкостного сопротивлений X_C в цепи возникает резонанс напряжений.

Изменяя индуктивность катушки в LC-цепи необходимо снять показания измерительных приборов. По данным измерений рассчитать цепь и построить диаграмму, а также резонансные кривые.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть, подготовить отчет и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с измерительными приборами.
3. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 2.4).
4. Установить ручку регулятора входного напряжения ЛАТР в нулевое положение (т.е. повернуть по часовой стрелке до упора). Собранную схему предъявить для проверки преподавателю.

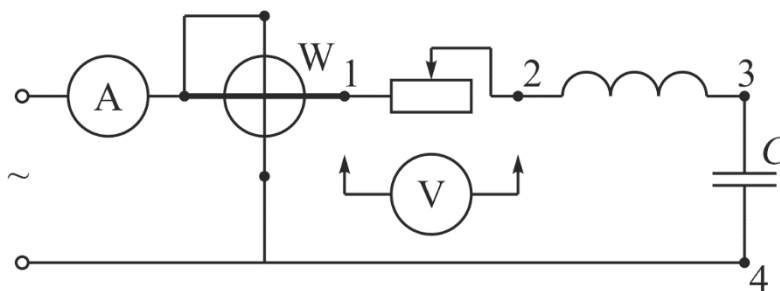


Рис. 2.4. Исследуемая LC-цепь

5. Исследуйте особенности резонанса напряжений, для чего изменяйте емкость от нуля до максимума, занося данные в таблицы 2.1.
6. По окончании измерений ручку регулятора ЛАТР повернуть до упора по часовой стрелке.

Таблица 2.1.

№	Измерения						
	I, A	U, B	U_{12}, B	U_{23}, B	U_{34}, B	U_{13}, B	$P, Вт$

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По показаниям приборов вычислите величины активных и реактивных составляющих напряжений, пользуясь формулами:

$$U_a = \frac{P}{I}, \quad U_L = \sqrt{U_{13}^2 - U_a^2}, \quad U_p = U_C - U_L, \quad \cos \varphi = \frac{U_a}{U}, \quad \sin \varphi = \frac{U_p}{U}.$$

2. Заполнить таблицу 2.2.

Таблица 2.2

№	Вычисления						
	U_a, B	U_L, B	U_p, B	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	φ	C

3. По данным измерений и вычислений постройте резонансные кривые $I, I=f(C), U_a=f(C), U_L=f(C), U_C=f(C), \varphi=f(C)$.
4. Постройте векторные диаграммы для случаев: $\varphi < 0, \varphi = 0, \varphi > 0$.
5. Сделайте выводы по работе.
6. Ответить на контрольные вопросы и защитить выполненную лабораторную работу

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Сформулируйте закон Ома для цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости.
2. В какой цепи и при каком условии наступает резонанс напряжений?
3. Объясните энергетические процессы, протекающие в электрической цепи при резонансе напряжений.
4. Объясните, почему при резонансе напряжений ток в цепи максимален? Почему сдвиг фаз φ равен нулю?
5. Как изменится резонансная частота в цепи с последовательным соединением r, L, C , если емкость увеличить в 4 раза?
6. На каком участке цепи (рис. 2.1) напряжение при резонансе равно напряжению источника питания?
7. Оцените величину коэффициента мощности при резонансе напряжений по сравнению с коэффициентом мощности до резонанса.
8. Каким электроизмерительным прибором можно определить состояние резонанса в неразветвленной цепи, если настройка в резонанс ведется при неизменном действующем значении входного напряжения?
9. К каким аварийным последствиям может привести резонанс напряжений в электрических цепях?

Лабораторная работа № 3

ОДНОФАЗНАЯ ЦЕПЬ

С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ.

РЕЗОНАНС ТОКОВ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально исследовать работу электрической цепи однофазного синусоидального тока с параллельным соединением элементов:

1) исследование влияния величины индуктивности катушки на электрические параметры цепи однофазного синусоидального напряжения с параллельным соединением элементов;

2) опытное определение условий возникновения в данной цепи резонанса токов;

3) построить векторные диаграммы и резонансные кривые при последовательном соединении катушки и конденсатора;

4) научиться вычислять параметры цепи и строить векторные диаграммы цепи с параллельным соединением элементов.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На рис. 3.1 представлена электрическая цепь однофазного синусоидального напряжения с параллельным соединением двух приемников, один из которых на схеме замещен последовательным соединением резистора и емкостного элемента, а второй – последовательным соединением резистора и индуктивного элемента.

Токи в приемниках определяются по закону Ома

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}, I_2 = \frac{U}{Z_2}, \quad (3.1)$$

где U – действующее значение напряжения источника электрической энергии;

I_1, I_2 – токи в параллельных ветвях цепи;

Z_1, Z_2 – полные сопротивления ветвей.

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_C^2}, \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_L^2}, \quad (3.2)$$

где R_1, X_C – активное и емкостное сопротивление первой ветви;

R_2, X_L – активное и индуктивное сопротивление второй ветви.

Вектор тока источника электрической энергии равен сумме векторов токов приемников

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2, \quad (3.3)$$

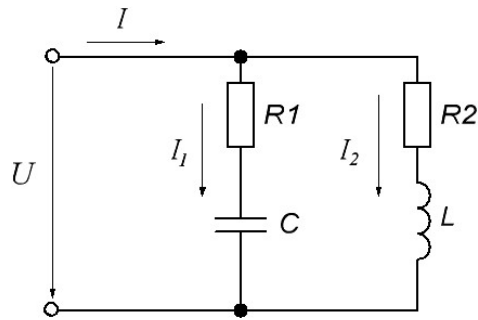


Рис. 3.1. Параллельная цепь переменного тока

При исследовании процессов в цепях с параллельным соединением приемников вектор тока в каждой ветви условно представляют в виде суммы векторов активной и реактивной составляющих тока. Вектор активной составляющей тока I_a совпадает по направлению с вектором напряжения U , а вектор реактивной составляющей I_p перпендикулярен этому вектору (рис. 3.2).

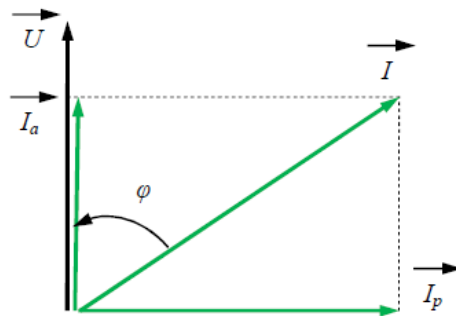


Рис. 3.2. Разложение тока на активную и реактивную составляющие

Из треугольника токов (рис. 3.2) величины активной и реактивной составляющих тока определяются

$$I_a = I \cos \varphi; \quad I_p = I \sin \varphi, \quad (3.4)$$

где φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

На рис. 3.3 представлена векторная диаграмма напряжений и токов для параллельной цепи переменного тока, приведенной на рис. 3.1.

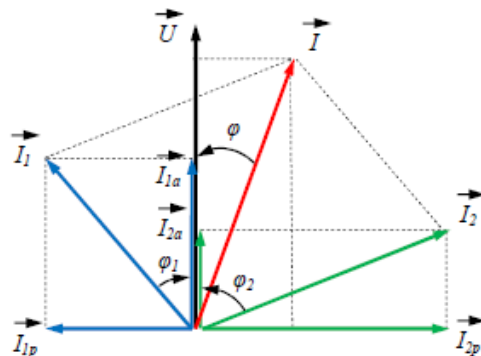


Рис. 3.3. Векторная диаграмма напряжений и токов параллельной цепи переменного тока

Величины активной и реактивной составляющих токов приемника

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1; \quad I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1, \quad (3.5)$$

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2, \quad (3.6)$$

где φ_1 и φ_2 – углы сдвига фаз между вектором напряжения U и векторами токов I_1 и I_2 .

Представление токов активными и реактивными составляющими позволяет путем их сложения найти активную I_a и реактивную I_p составляющую тока источника и по ним определить ток источника I

$$\vec{I}_a = \vec{I}_{1a} + \vec{I}_{2a}; \quad \vec{I}_p = \vec{I}_{1p} + \vec{I}_{2p}; \quad \vec{I} = \vec{I}_a + \vec{I}_p. \quad (3.7)$$

Из векторной диаграммы рис. 3.3 следует

$$I_a = I_{1a} + I_{2a}; \quad I_p = I_{1p} + I_{2p}; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (3.8)$$

Косинус угла сдвига фаз между вектором тока источника I и вектором напряжения источника U определяется из выражения

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I}. \quad (3.9)$$

Иногда при расчетах параллельных цепей переменного тока используют понятия проводимости. Активная, реактивная и полная проводимости связаны с активными и реактивными сопротивлениями этих же ветвей равенствами

$$g = \frac{R}{Z^2}; \quad b = \frac{X}{Z^2}; \quad Y = \frac{1}{Z}. \quad (3.10)$$

Полная проводимость всей ветви определяется выражением

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}, \quad (3.11)$$

где $g = \sum_{K=1}^N g_K$, $b_L = \sum_{K=1}^N b_{LK}$, $b_C = \sum_{K=1}^N b_{CK}$ – активная, индуктивная и емкостная проводимости всей электрической цепи, равные сумме всех активных, индуктивных и емкостных проводимостей отдельных параллельных ветвей;

$b_L - b_C = b$ – реактивная проводимость всей электрической цепи.

Угол сдвига фаз между общим током цепи и напряжением источника питания

$$\varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g}. \quad (3.12)$$

Активные и реактивные проводимости связаны с полной проводимостью выражениями

$$g = Y \cos \varphi; \quad b = Y \sin \varphi. \quad (3.13)$$

Величина общего тока, потребляемого участком цепи с параллельным соединением активных, индуктивных и емкостных сопротивлений, определяется выражением

$$I = U \cdot Y, \quad (3.14)$$

где U – напряжение на зажимах цепи;

Y – полная проводимость всей цепи.

2.2. РЕЗОНАНС ТОКОВ

В электрических цепях с параллельным соединением приемников, содержащих индуктивные и емкостные элементы, может, при определенных условиях, возникать явление резонанса токов. Резонансом токов называется режим, при котором ток источника электрической энергии совпадает по фазе с напряжением источника, т.е. $\varphi = 0$.

Применительно к электрической цепи, изображенной на рис. 3.1:

$$Q = Q_L - Q_C = S \sin \varphi = 0; I_p = I_{2p} - I_{1p} = I \sin \varphi = 0. \quad (3.15)$$

Следовательно, условием резонанса токов является равенство нулю реактивной мощности цепи и реактивной составляющей тока источника электрической энергии.

Из условия резонанса токов следует, что

$$Q_L = Q_C, I_{1p} = I_{2p}. \quad (3.16)$$

При резонансе токов коэффициент мощности цепи

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{I_a}{I} = 1. \quad (3.17)$$

Ток в ветви с источником электрической энергии содержит только активную составляющую, является минимальным по величине и может оказаться значительно меньше токов в каждом из параллельно включенных приемников

$$I = I_{1a} + I_{2a} = I_a = I_{min}. \quad (3.18)$$

2.3. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ИДЕАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ И РЕАЛЬНОЙ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Рассмотрим электрическую цепь параллельно соединенных идеальной емкости и реальной катушки индуктивности. В большинстве случаев такие допущения делаются на практике (рис. 3.4).

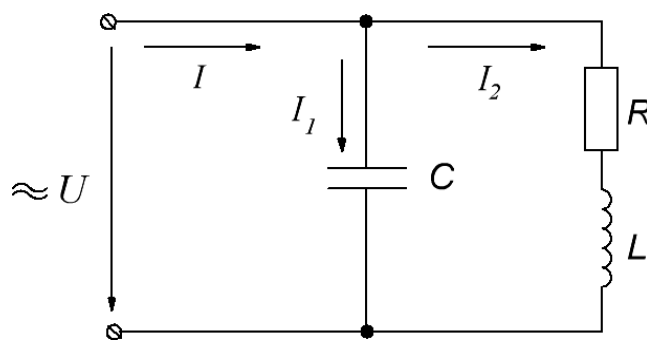


Рис. 3.4. Параллельная цепь однофазного переменного тока

Рассмотрим три возможных случая.

1. При $b_L > b_C$ нагрузка имеет индуктивный характер. Вектор общего тока I отстает по фазе от вектора напряжения U на угол φ (рис. 3.5).

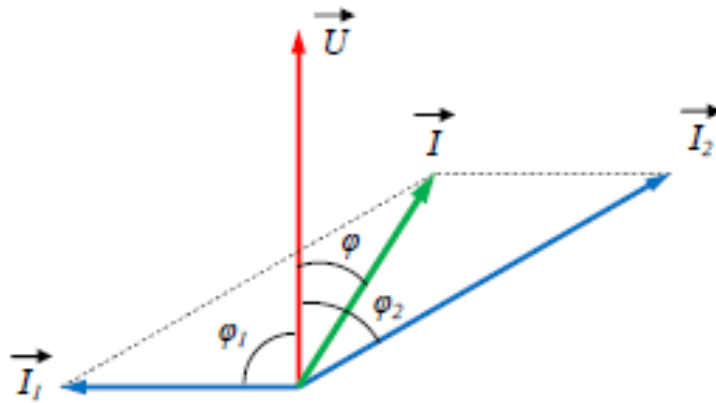


Рис. 3.5. Векторная диаграмма при $b_L > b_C$

Ток через конденсатор $I_1 = b_C \cdot U$. Ток через индуктивность $I_2 = b_L \cdot U$.

При этом ток через конденсатор по величине меньше тока через катушку индуктивности

$$I_1 < I_2. \quad (3.19)$$

2. При $b_L < b_C$ цепь имеет емкостной характер. Вектор общего тока I опережает по фазе вектор напряжения U источника на угол φ (рис. 3.6).

3.

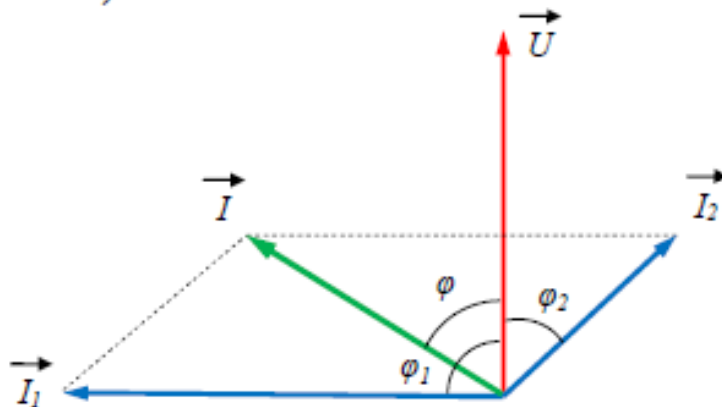


Рис. 3.6. Векторная диаграмма при $b_L < b_C$

Ток через конденсатор по величине больше тока через катушку индуктивности

$$I_1 > I_2. \quad (3.20)$$

4. Если $b_L = b_C$, в цепи наступает резонанс токов, при котором сдвиг фаз между общим напряжением и общим током оказывается равным нулю (рис. 3.7).

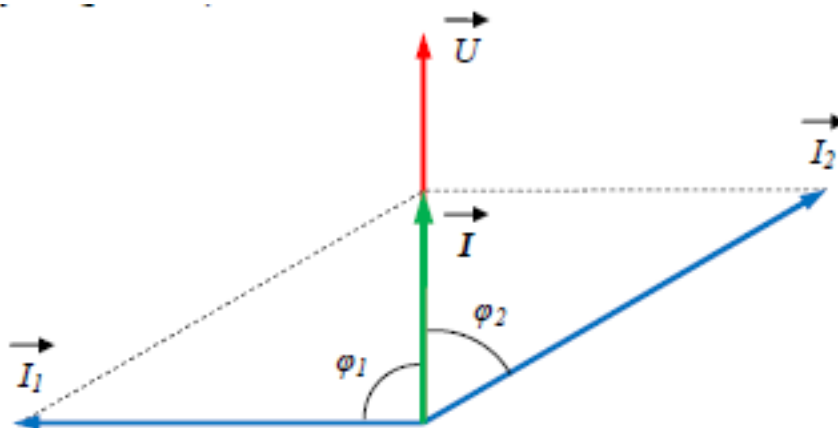


Рис. 3.7. Векторная диаграмма при $b_L = b_C$

Общее сопротивление цепи при резонансе резко увеличивается, а общий ток I уменьшается и становится минимальным

$$I = U \cdot Y = U \cdot \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = U \cdot g. \quad (3.21)$$

Таким образом, полное сопротивление цепи оказывается чисто активным и очень высоким (g – малая величина, определяемая омическим сопротивлением проводов катушки: $Y = g$).

Энергетический процесс при резонансе можно рассматривать как наложение двух процессов: необратимого преобразования потребляемой от источника энергии в тепло, выделяемое в активном сопротивлении, и процесса, представляющего собой колебание энергии внутри цепи – между магнитным полем катушки индуктивности и электрическим полем конденсатора. Первый процесс характеризуется величиной активной мощности P , а второй – величиной реактивной мощности $Q_L = Q_C$. Колебания между источником и цепью не происходит: $Q = Q_L - Q_C = 0$.

Если активная проводимость катушки меньше ее индуктивной проводимости, то токи через катушку и конденсатор могут значительно превышать общий ток I . Превышение токов I_1 и I_2 над общим током характеризует параметр цепи, который называется коэффициентом добротности

$$q = \frac{b_L}{g} = \frac{b_C}{g} = \frac{I_1}{I} \approx \frac{I_2}{I}. \quad (3.22)$$

Резонансные явления очень широко применяются в электротехнике и в радиотехнических устройствах. Электрические фильтры различных электротехнических устройств являются также резонансными цепями.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной лабораторной работе исследуется цепь с параллельным соединением постоянного конденсатора и переменной индуктивности. Изменение индуктивности в катушке осуществляется в результате изменения воздушного зазора в подвижном ферромагнитном сердечнике.

Изменяя индуктивность катушки в LC -цепи, необходимо снять показания измерительных приборов для трех случаев:

- а) цепь имеет индуктивный характер ($I_L > I_C$);
- б) резонанс ($I_L = I_C$);
- в) цепь имеет емкостной характер ($I_L < I_C$).

По данным измерений рассчитать цепь и построить векторные диаграммы.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Изучить теоретическую часть, подготовить отчет и получить допуск к выполнению лабораторной работы.

2. Ознакомиться с оборудованием и измерительными приборами.

3. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 3.8. В качестве амперметров $PA2$ и $PA3$ использовать стрелочные измерительные приборы типа АСТ, ваттметр АСТД.

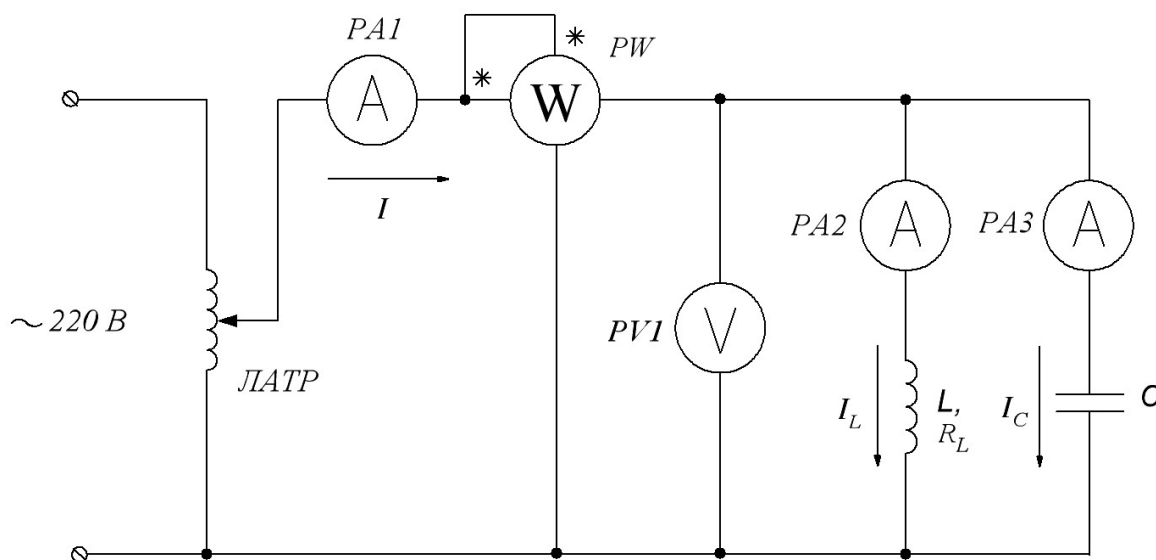


Рис. 3.8. Исследуемая LC -цепь

4. Подать напряжение с ЛАТР на электрическую схему, измерить все токи, напряжение и мощность. Измерения проводятся отдельно для трех случаев:

- а) цепь имеет индуктивный характер ($I_L > I_C$);
- б) резонанс ($I_L = I_C$);
- в) цепь имеет емкостной характер ($I_L < I_C$).

Экспериментальные данные занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1. – Параметры исследуемой LC–цепи

Характер цепи	Измерено					Вычислено								
	$U, В$	$I, А$	$I_C, А$	$I_L, А$	$P, ВТ$	$Y, СМ$	$g, СМ$	$b, СМ$	$\cos\varphi$	φ	$b_L, СМ$	$L, ГН$	$b_C, СМ$	$C, Ф$
$b_L > b_C$														
$b_L = b_C$														
$b_L < b_C$														

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Используя полученные экспериментальные данные, рассчитать параметры цепи и занести полученные результаты в таблицу 3.1.

Формулы для расчета:

- проводимости

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{U}; \quad (3.23)$$

$$P = UI \cos\varphi; \quad g = Y \cos\varphi; \quad b = Y \sin\varphi; \quad (3.24)$$

- общий сдвиг фаз в цепи

$$\varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g} = \arctg \frac{b}{g}; \quad (3.25)$$

- емкостная реактивная проводимость

$$b_C = \frac{1}{X_C} = \frac{I_C}{U}; \quad X_C = \frac{1}{2\pi f C}; \quad f = 50 \text{ Гц}; \quad (3.26)$$

- полное сопротивление катушки индуктивности

$$Z_L = \frac{U}{I_L}; \quad (3.27)$$

- активное сопротивление катушки, учитывающее потери энергии в обмотке и стальном сердечнике катушки

$$R_L = \frac{P}{I_L^2}; \quad (3.28)$$

- индуктивное сопротивление катушки

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}; \quad (3.29)$$

- индуктивность катушки

$$L = \frac{X_L}{\omega}, \quad (3.30)$$

где $\omega = 2\pi f$ и частота $f = 50$ Гц;

- индуктивная реактивная проводимость

$$b_L = \frac{X_L}{Z_L^2} = \frac{X_L I_L^2}{U^2}. \quad (3.31)$$

2. Для всех трех случаев из табл. 3.1 построить векторные диаграммы токов и напряжений.

Векторные диаграммы построить по аналогии с рис. 3.3, для этого воспользоваться формулами

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1; \quad I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1, \quad (3.32)$$

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2, \quad (3.33)$$

учитывая, что $\varphi_2 = -90^\circ$ (идеальный конденсатор), сдвиг фаз на катушке индуктивности (первой ветви)

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_L}{Z_L}. \quad (3.34)$$

$$I_a = I_{1a} + I_{2a}; \quad I_p = I_{1p} - I_{2p}; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (3.35)$$

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Что такое параллельная цепь?
2. Что такое активная и реактивная составляющие тока?
3. Что такое полная, активная и реактивная проводимости?
4. Как выглядит векторная диаграмма для цепи с индуктивной, емкостной нагрузкой и при резонансе токов?
5. Назовите условие резонанса в электрических цепях.
6. Каковы признаки явления резонанса в параллельной цепи?
7. Что такое добротность контура и способы ее измерения?
8. Что определяет добротность конденсатора и катушки индуктивности?
9. Как получить резонанс параллельного колебательного контура на заданной частоте $f_{\text{рез}}$?

Лабораторная работа № 4

СОЕДИНЕНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ «ЗВЕЗДОЙ»

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование симметричных и несимметричных режимов работы трехфазной цепи при соединении нагрузки «звездой», определение соотношений между линейными и фазными напряжениями при различных режимах работы, построение векторных диаграмм. Выяснение роли нулевого провода в четырехпроводной системе трехфазного тока.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Трехфазная электрическая цепь – это совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга и создаваемые общим источником электрической энергии.

Фаза – отдельная электрическая цепь, входящая в состав трехфазной цепи, в которой может протекать один из токов трехфазной системы. Фазными называют отдельные элементы этой цепи, например, фазные обмотки трехфазного источника и др. Общепринятое обозначение фаз трехфазной цепи приведено в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Обозначение фаз в трехфазных электрических цепях

Фаза	Источник		Приемник	
	Начало	Конец	Начало	Конец
<i>A</i>	<i>A</i>	<i>X</i>	<i>a</i>	<i>x</i>
<i>B</i>	<i>B</i>	<i>Y</i>	<i>b</i>	<i>y</i>
<i>C</i>	<i>C</i>	<i>Z</i>	<i>c</i>	<i>z</i>

Источник электрической энергии и потребитель соединяются при помощи линейных проводов.

Линейные провода – провода, соединяющие начала одноименных фаз источника и приемника.

В трехфазной электрической цепи различают фазные и линейные токи и напряжения.

Фазное напряжение $U_{\text{ф}}$ – напряжение между началом и концом фазы источника энергии или приемника.

Фазный ток $I_{\text{ф}}$ – ток в фазе трехфазной цепи. Линейный ток $I_{\text{л}}$ – ток в линейных проводах.

Линейное напряжение $U_{\text{л}}$ – напряжение между линейными проводами или между началами разных фаз.

Если три фазы потребителя имеют одинаковые сопротивления $Z_a = Z_b = Z_c$ и сдвиг фаз φ в фазах одинаковый, то такой приемник (потребитель) называют симметричным (равномерным). Если не соблюдается хотя бы одно из условий равенства, то такой приемник называют несимметричным (неравномерным). В качестве примера симметричной нагрузки можно назвать трехфазные трансформаторы, трехфазные асинхронные двигатели и др. Несимметричной нагрузкой является осветительная сеть.

Основными способами соединения фаз генератора и приемника являются соединения звездой и треугольником. В данной лабораторной работе исследуется трехфазная цепь соединения звездой.

2.2. СОЕДИНЕНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗВЕЗДОЙ

Соединение, при котором все концы фаз приемника или источника соединены в один узел, а к началам фаз присоединяются линейные провода, называют соединением звездой. Узел, в котором соединяются концы фаз, называют нулевой или нейтральной точкой.

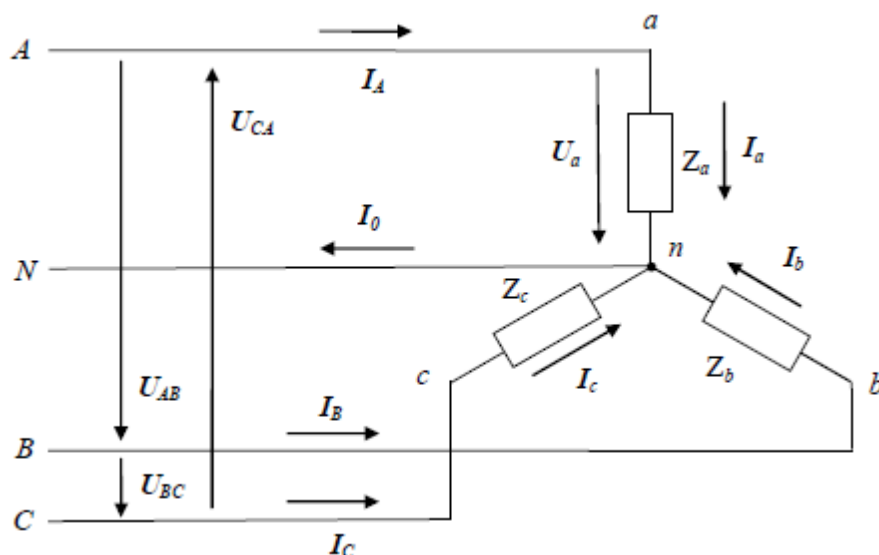


Рис. 4.1. Схема трехфазной цепи при соединении потребителя звездой

На рисунке 4.1 показано соединение звездой фаз приемника:

- $A-a$, $B-b$, $C-c$ – линейные провода;
- точка N – нулевая (нейтральная) точка генератора, соответственно точка n – нулевая (нейтральная) точка приемника, потребителя;
- $N-n$ – нулевой или нейтральный провод;
- I_0 – ток в нейтральном проводе (называют нулевым или нейтральным током);
- U_a , U_b , U_c – фазные напряжения приемника (на рисунке 4.1 показан только одно фазное напряжение – U_a);
- I_a , I_b , I_c – фазные токи потребителя;

- U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – линейные напряжения;
- I_A, I_B, I_C – линейные токи;
- Z_a, Z_b, Z_c – сопротивления фаз нагрузки.

Как видно из рис. 4.1, если потребители соединены в звезду с нулевым проводом, то фазный ток равен линейному току

$$I_\Phi = I_L. \quad (4.1)$$

Тогда ток в нулевом проводе

$$I_0 = I_A + I_B + I_C. \quad (4.2)$$

Линейные напряжения равны разности фазных напряжений

$$U_{AB} = U_a - U_b, \quad (4.3)$$

$$U_{BC} = U_b - U_c, \quad (4.4)$$

$$U_{CA} = U_c - U_a. \quad (4.5)$$

Сложив левые и правые части равенств 4.3–4.5, получим:

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} = 0. \quad (4.6)$$

Соотношения (4.3–4.5) связывают фазные и линейные напряжения при соединении трехфазных приемников звездой и используются для определения значений этих напряжений. Они справедливы для любых видов нагрузки.

2.3. СИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЧЕТЫРЕХ-ПРОВОДНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

В случае симметричной нагрузки токи в фазах равны и определяются по закону Ома

$$I_a = \frac{U_a}{Z_a}; \quad I_b = \frac{U_b}{Z_b}; \quad I_c = \frac{U_c}{Z_c}. \quad (4.7)$$

Углы сдвига фаз также будут равны и определяются для каждой фазы

$$\varphi_a = \arctg \frac{X_a}{R_a}; \quad \varphi_b = \arctg \frac{X_b}{R_b}; \quad \varphi_c = \arctg \frac{X_c}{R_c}. \quad (4.8)$$

Векторная диаграмма для случая симметричной нагрузки строится следующим образом (рис. 4.2).

1. Выбираем масштаб напряжения $M_U = \dots$ В/см и тока $M_I = \dots$ А/см.
2. Откладываем в масштабе вектора фазных напряжений U_a, U_b, U_c под углом 120° друг относительно друга.
3. Строим векторы фазных токов I_a, I_b, I_c , которые повернуты относительно векторов соответствующих напряжений U_a, U_b, U_c на углы сдвига фаз $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ (на рис. 4.2 показан случай активно-индуктивной нагрузки).
4. Строим векторы линейных напряжений U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} . Векторы линейных напряжений U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} определяются по формулам (4.3–4.5) и равны разности соответственных фазных напряжений. Из рис. 4.2 видно, что звезда линейных напряжений опережает звезду фазных напряжений на угол 30° .

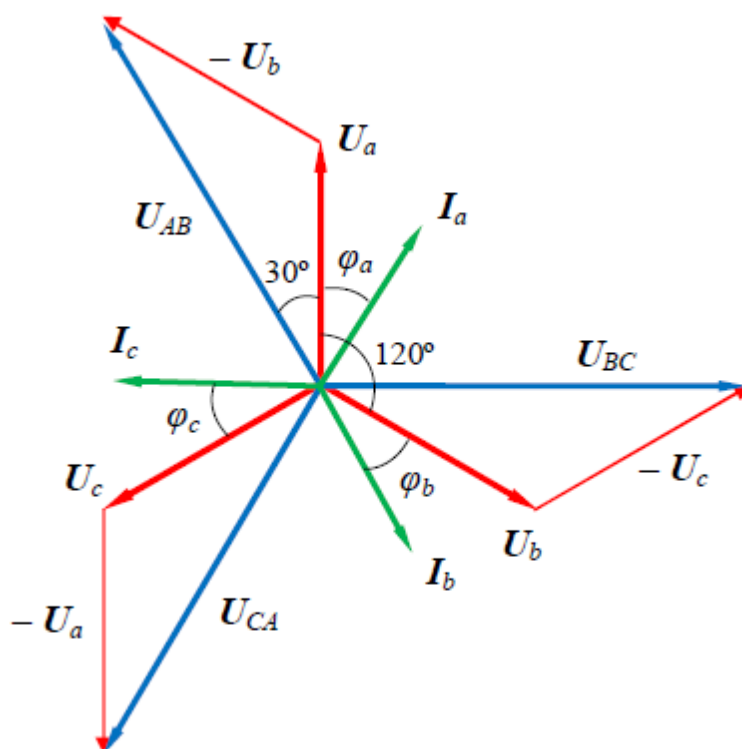


Рис. 4.2. Полярная векторная диаграмма для режима симметричной нагрузки при соединении потребителей в звезду

Если произвести вычитание векторов фазных напряжений U_a , U_b , U_c по способу параллелограмма, то векторная диаграмма симметричной трехфазной системы будет выглядеть как равнобедренный треугольник (рис. 4.3) и называется топографической векторной диаграммой.

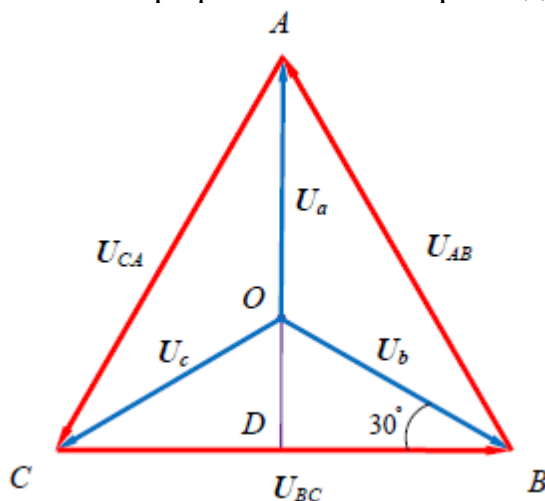


Рис. 4.3. Топографическая векторная диаграмма для симметричной нагрузки при соединении потребителей звездой

Из топографической векторной диаграммы можно получить соотношение между фазными и линейными напряжениями при соединении «звездой» в случае симметричной нагрузки. Для этого восстановим перпендикуляр из середины вектора линейного напряжения U_{BC} , в результате

получим прямоугольный треугольник OBD, из которого следует следующее соотношение:

$$\frac{1}{2} BD = OB \cdot \cos 30^\circ ,$$

т.е.

$$\frac{1}{2} U_L = U_\Phi \cdot \cos 30^\circ = U_\Phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} .$$

Отсюда

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi . \quad (4.9)$$

Запишем первый закон Кирхгофа для нулевого узла потребителя n

$$I_0 = I_A + I_B + I_C. \quad (4.10)$$

В случае симметричной нагрузки ток в нейтральном проводе будет равен нулю (это можно доказать сложив геометрически вектора фазных токов I_a, I_b, I_c)

$$I_0 = I_A + I_B + I_C = 0. \quad (4.11)$$

Если ток в нулевом проводе равен нулю, следовательно, нулевой провод можно не ставить. Поэтому в случае симметричной нагрузки иногда применяется трёхпроводное соединение звездой, т.е. соединение потребителей звездой без нулевого провода.

2.4. НЕСИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЧЕТЫРЕХ-ПРОВОДНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Если три фазы потребителя имеют разные сопротивления Z_a, Z_b, Z_c , то фазные токи также будут неравны: $I_A \neq I_B \neq I_C$. Токи могут быть неравными как по величине, так и по направлению. Ток в нулевом проводе в этом случае будет отличен от нуля и определяется по векторной диаграмме (рис. 4.4) или аналитическим путем.

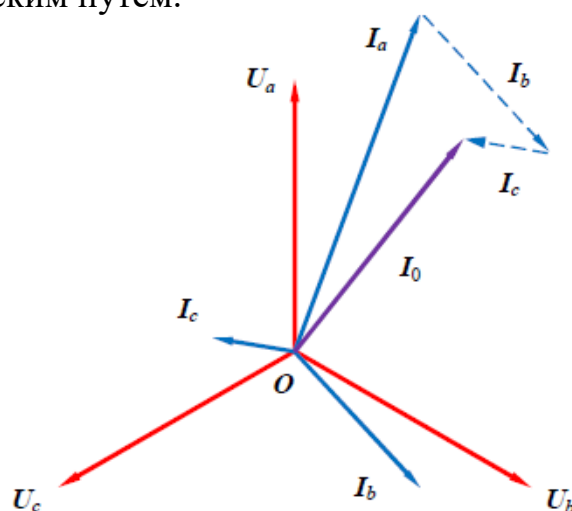


Рис. 4.4. Графический метод определения тока в нулевом проводе при несимметричной нагрузке

Из рис. 4.4 видно, что ток в нулевом проводе I_0 не равен нулю. Значит, возникает падение напряжения между нулевыми точками генератора и приемника U_{Nn} . Это напряжение называется нулевым напряжением. Нулевое напряжение позволяет сохранить равенство фазных напряжений U_a , U_b , U_c в условиях неравенства фазных токов.

Нейтральный провод предотвращает возможность возникновения явления «перекоса фаз». Это такое явление, когда в одних фазах напряжение будет повышено, а в других – понижено. Это видно по векторной диаграмме напряжений при несимметричной нагрузке (рис. 4.5). На этой диаграмме пунктирными линиями обозначены векторы фазных напряжений при симметричной нагрузке. При несимметричной нагрузке нулевая точка при отсутствии нулевого провода смещается в точку O_1 . Напряжение между точками O и O_1 и является нулевым напряжением между нулевыми точками генератора и приемника U_{Nn} . Из диаграммы видно, что фазные напряжения U_a , U_b , U_c изменились и неодинаковы как по величине, так и по фазе. Это явление и называется перекосом фаз.

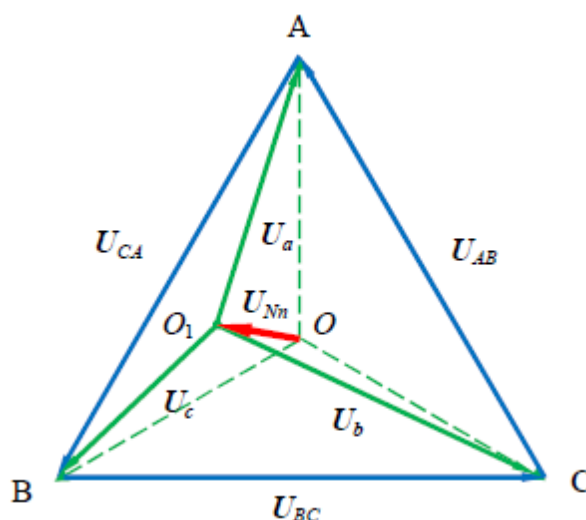


Рис. 4.5. Векторная диаграмма напряжений при несимметричной нагрузке

Перекас фаз является нежелательным явлением, так как приводит к неодинаковой работе фазных потребителей трехфазной системы. Например, в случае осветительной сети это может привести к тому, что одни лампы дадут незначительную освещенность, а другие могут перегореть из-за повышенного напряжения в фазе.

Для обеспечения симметричной системы напряжений во всех фазах и независимой работе отдельных приемников в случае несимметричной нагрузки используется схема звезда с нулевым проводом (рис. 4.1). По технике безопасности на нулевой провод запрещается ставить выключатель, предохранитель. Эта мера применяется для устранения возможности разрыва нулевого провода и, следовательно, возникновения перекаса фаз.

2.5. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ФАЗЫ ПРИЕМНИКА

Короткое замыкание фазы приемника является частным случаем неравномерной нагрузки фаз генератора. При наличии нулевого провода короткое замыкание любой фазы **приводит к аварийной ситуации**, так как ток в этой фазе резко увеличивается.

Короткое замыкание одной из фаз приемника при отсутствии нулевого провода **не приводит к аварийной ситуации**, так как линейные напряжения сети прикладываются в этом случае к двум другим фазам приемника.

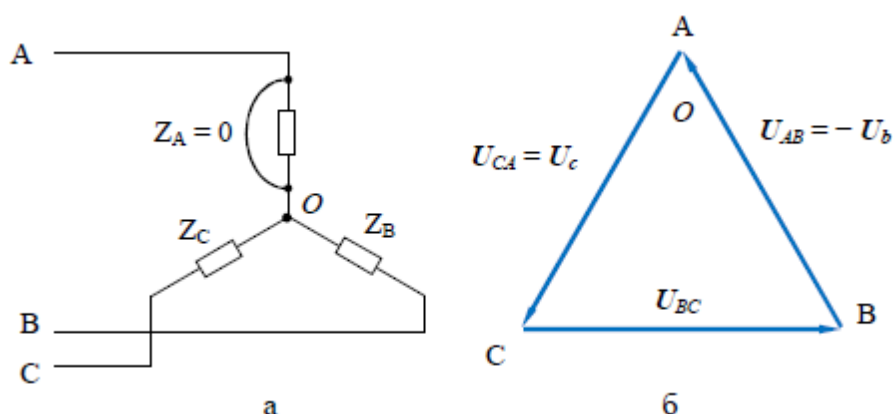


Рис. 4.6. Схема (а) и топографическая диаграмма при коротком замыкании в фазе А (б)

При коротком замыкании одной из фаз, например фазы A , потенциал точки A становится равным потенциалу точки O , тогда напряжение фазы A будет равно нулю, т.е. $U_a = 0$. Следовательно, ток фазы A также будет равен нулю: $I_A = 0$ (рис. 4.6, а). Нулевая точка O потребителя при этом смещается в точку A . Видно, что напряжения двух других фаз становятся равным линейным напряжениям $U_b = -U_{AB}$, $U_c = U_{CA}$, т.е. увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз. Нулевое напряжение становится равным фазному напряжению генератора $U_O = E_A$.

2.6. ОБРЫВ ЛИНЕЙНОГО ПРОВОДА

При обрыве линейного провода также нужно различать два случая. При обрыве одного линейного провода в трехфазной трехпроводной цепи (т.е. без нулевого провода), например провода A (рис. 4.7, а), цепь превращается в однофазную с последовательным соединением приемников и подключенной к одному линейному напряжению, т.е. $U_{BC} = U_b - U_c$. При этом напряжения на фазах B и C распределяются пропорционально их сопротивлениям Z_b и Z_c . Например, если $Z_b = Z_c$, то $U_b = U_c = 0,5 U_{BC}$ (рис. 4.7, б). Нулевая точка O смещается вниз и делит вектор U_{BC} на две равные части.

Если произойдет обрыв одного линейного провода (перегорание предохранителя в фазе, отключение фазы от сети и т.д.) в трехфазной цепи с нулевым проводом, то это приведет к исчезновению тока и напряжения в этой фазе. Напряжения на неповрежденных фазах не изменятся $U_b = U_c = U_\phi$. Так, например, при обрыве фазы А ток в этой фазе становится равным нулю ($I_A = 0$). Ток в нулевом проводе будет равен $I_0 = (I_B + I_C)$.

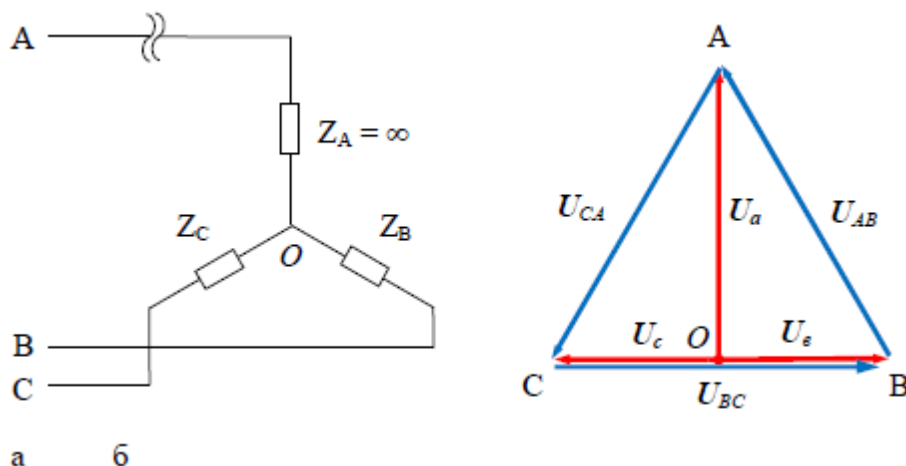


Рис. 4.7. Схема (а) и топографическая векторная диаграмма при обрыве линейного провода А (б)

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе исследуется работа трехфазной цепи переменного тока соединением «треугольник» при различных видах нагрузки. Изменяя характер нагрузки в фазе А, осуществить разные режимы работы трехфазной цепи. По результатам измерений построить векторные диаграммы для всех режимов работы трехфазной цепи.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Подготовить отчет, изучить теоретическую часть и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с оборудованием и измерительными приборами.
3. Собрать схему электрической цепи и **представить** для проверки преподавателю.
4. Измерьте токи и напряжения при равномерной нагрузке фаз (все лампы включены).
5. Изменяя путем выкручивания ламп реостата сопротивление фаз, создайте неравномерную нагрузку фаз и измерьте токи и напряжения (фазные, линейные и в нулевом проводе).
6. При неравномерной нагрузке фаз отключите нулевой провод и повторите измерения токов и напряжений (фазных и линейных).

7. Отключите нагрузку одной фазы (выкрутите все лампы в одной из фаз), а в других фазах создайте одинаковую нагрузку (включите все лампы в оставшихся фазах). Повторите измерение всех токов и напряжений без нулевого провода.

8. Повторите измерения при неравномерной нагрузке.

9. Результаты измерений занесите в табл.4.1.

Таблица 4.1.

Условие измерения	I_A , А	I_B , А	I_C , А	I_0 , А	U_A , В	U_B , В	U_C , В	U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , В
I										
II										
III										
IV										
V										

Примечание к таблице 4.1:

I – равномерная нагрузка с нулевым проводом;

II – неравномерная нагрузка с нулевым проводом;

III – неравномерная нагрузка без нулевого провода;

IV – равномерная нагрузка с выключенной одной фазой и отсутствием нулевого провода;

V – неравномерная нагрузка с выключенной одной фазой и отсутствием нулевого провода.

8. По данным измерений начертите векторные диаграммы для всех случаев и проверьте теоретические выводы.

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Рассчитать для всех режимов работы цепи отношения линейных и фазных токов. Убедиться, что для симметричной нагрузке $U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}$ при включенном и отключенном нулевом проводе, а для несимметричной нагрузки только при включенном нулевом проводе, т.е. с включением нулевого провода во всех режимах фазные напряжения становятся одинаковыми.

2. Для каждого режима работы построить в масштабе векторные диаграммы.

3. Ответить на контрольные вопросы.

4. Оформить отчет в соответствии с методическими указаниями и предоставить для защиты преподавателю.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Нарисовать электрическую схему соединения трех однофазных приемников «звездой», обозначить все токи и напряжения.

2. Какое соединение однофазных приемников электрической энергии называют звездой?

3. Чем отличается симметричная нагрузка от несимметричной?

4. Какие два вида напряжений и токов различают в трехфазных цепях? Дать их определение.

5. Какие существуют соотношения между линейными и фазными напряжениями при соединении приемников «звездой»?

6. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями при соединении приемников «звездой» в случае симметричной нагрузки?

7. Докажите, что в трехфазной цепи при соединении потребителей «звездой» сумма линейных напряжений всегда равна нулю.

8. Какова роль нулевого провода в четырехпроводной трехфазной цепи?

9. Как определить силу тока в нулевом проводе, если известна сила тока в каждой из фаз?

10. Объяснить построение векторных диаграмм при различных видах нагрузки.

Учебное издание

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ЦЕПИ И СИГНАЛЫ**

Рабочая тетрадь
для выполнения лабораторных работ

Составители:

САПЕЛКО Татьяна Ивановна
ШИЁНОК Юрий Владимирович

Технический редактор
Компьютерный дизайн

Г.В. Разбоева

Л.И. Ячменёва

Подписано в печать 2022. Формат 60х84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 2,71. Уч.-изд. л. 2,33. Тираж экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение – учреждение образования
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

Свидетельство о государственной регистрации в качестве издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/255 от 31.03.2014.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».
210038, г. Витебск, Московский проспект, 33.