

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Часть I. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Допущено Редакционно-издательским советом УГАТУ в качестве учебного пособия для студентов всех форм обучения, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и специалистов: 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», 09.03.02 «Информационные системы и технологии», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.03.03 «Энергетическое машиностроение», 15.03.01 «Машиностроение», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», 20.03.01 «Техносферная безопасность», 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», 23.03.01 «Технология транспортных процессов», 24.03.04 «Авиастроение», 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов», 25.03.01 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей», 27.03.01 «Стандартизация и метрология», 27.03.03 «Системный анализ и управление», 27.03.04 «Управление в технических системах», 27.03.05 «Инноватика», 28.03.02 «Наноинженерия», 20.05.01 «Пожарная безопасность», 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», 27.05.01 «Специальные организационно-технические системы»

Уфа 2015

Авторы: Р. В. Ахмадеев, И. В. Вавилова, П. А. Грахов, Т. М. Крымская,
В. С. Лукманов, О. В. Мельничук

УДК 621.3(07)
ББК 31.2я7
Э45

Рецензенты:

*кафедра технологических машин и прикладной физики
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса»,
д-р техн. наук, проф. Яруллин Р. Б.;*
ПАО «Нефтеавтоматика», канд. техн. наук, ведущий инженер Дмитриев О. А.

Электротехника и электроника. Часть I. Электрические цепи: учеб.
Э45 пособие / Р. В. Ахмадеев, И. В. Вавилова, П. А. Грахов, Т. М. Крымская,
В. С. Лукманов, О. В. Мельничук; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа:
Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2015. – 97 с.
ISBN 978-5-4221-0794-0

Рассматриваются вопросы теоретического анализа электрических цепей и их практической реализации.

Предназначено для студентов вузов неэлектротехнических специальностей, изучающих дисциплины «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника», «Электротехника. Электроника», «Теоретическая электротехника», «Электротехника», «Электротехника, электроника и основы схемотехники», а также может быть полезно преподавателям и аспирантам, специализирующимся в области электротехники.

УДК 621.3(07)
ББК 31.2я7

ISBN 978-5-4221-0798-8
ISBN 978-5-4221-0794-0 (Ч. I)

© Уфимский государственный
авиационный технический университет, 2015

Учебное издание

АХМАДЕЕВ Рашит Вадутович
БАВИЛОВА Ирина Владимировна
ГРАХОВ Павел Анатольевич
КРЫМСКАЯ Татьяна Махмутовна
ЛУКМАНОВ Виталий Сабирович
МЕЛЬНИЧУК Ольга Васильевна

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Часть I. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Редактор

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. .
Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450000, Уфа - центр, ул. К. Маркса, 12.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1	
Электрические цепи постоянного тока с одним источником электрической энергии.....	8
1.1. Основные элементы электрических цепей постоянного тока и их характеристики.....	8
1.2. Задачи для самостоятельного решения.....	14
1.3. Примеры практической реализации электрических цепей постоянного тока с одним источником энергии.....	16
Глава 2	
Аналитические методы расчета электрических цепей постоянного тока.....	20
2.1. Основные методы расчета сложных электрических цепей постоянного тока.....	20
2.2. Задачи для самостоятельного решения.....	24
2.3. Пример практической реализации сложной электрической цепи постоянного тока.....	26
Глава 3	
Анализ однофазных неразветвленных цепей синусоидального тока с RL - и RC -приемниками.....	31
3.1. Основные параметры и характеристики неразветвленных электрических цепей синусоидального тока с RL - и RC -приемниками.....	31
3.2. Задачи для самостоятельного решения.....	37
3.3. Примеры практической реализации неразветвленных электрических цепей синусоидального тока с RL - и RC -приемниками.....	38
Глава 4	
Неразветвленные электрические цепи синусоидального тока.....	44
4.1. Анализ работы неразветвленных электрических цепей синусоидального тока.....	44
4.2. Задачи для самостоятельного решения.....	48
4.3. Пример практической реализации неразветвленной электрической цепи синусоидального тока при последовательном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.....	50

Глава 5	
Разветвленные электрические цепи синусоидального тока	55
5.1. Режимы работы разветвленных электрических цепей синусоидального тока.....	55
5.2. Задачи для самостоятельного решения.....	61
5.3. Пример практической реализации разветвленной электрической цепи синусоидального тока.....	63
Глава 6	
Трехфазные электрические цепи при соединении нагрузки звездой.....	68
6.1. Анализ работы трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки звездой.....	68
6.2. Задачи для самостоятельного решения.....	74
6.3. Примеры практической реализации трехпроводной и четырехпроводной трехфазных электрических цепей при соединении нагрузки звездой.....	74
Глава 7	
Трехфазная электрическая цепь при соединении нагрузки треугольником.....	82
7.1. Анализ работы трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки треугольником.....	82
7.2. Задачи для самостоятельного решения.....	86
7.3. Примеры практической реализации трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки треугольником.....	87
Заключение.....	93
Список литературы.....	94
Приложение.....	95

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие является составной частью учебно-методического комплекса (УМК) дисциплин «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника», «Электротехника. Электроника», «Теоретическая электротехника», «Электротехника», «Электротехника, электроника и основы схемотехники», включающего в себя сведения о структуре соответствующей дисциплины, ее содержании, а также рекомендации студентам по самостоятельной работе. Все перечисленные дисциплины имеют схожую структуру и содержание, поэтому в дальнейшем будут представлены общим названием «Электротехника и электроника».

Изложение и объем учебного материала соответствуют требованиям Федеральных государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) по направлениям подготовки бакалавров и специалистов, а также рекомендациям примерной программы дисциплины, утвержденной Научно-методическим советом, и учебным программам дисциплины для следующих направлений подготовки бакалавров: 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»; 09.03.02 «Информационные системы и технологии»; 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»; 13.03.03 «Энергетическое машиностроение»; 15.03.01 «Машиностроение»; 15.03.02 «Технологические машины и оборудование»; 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»; 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»; 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»; 20.03.01 «Техносферная безопасность»; 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»; 23.03.01 «Технология транспортных процессов»; 24.03.04 «Авиастроение»; 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов»; 25.03.01 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей»; 27.03.01 «Стандартизация и метрология»; 27.03.03 «Системный анализ и управление»; 27.03.04 «Управление в технических системах»; 27.03.05 «Инноватика»; 28.03.02 «Наноинженерия» и специалистов: 20.05.01 «Пожарная безопасность»; 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей»; 27.05.01 «Специальные организационно-технические системы».

Учебное пособие «Электротехника и электроника» состоит из трех частей:

- «Часть I. Электрические цепи»;
- «Часть II. Электромагнитные устройства»;
- «Часть III. Электропривод и электроника».

Учебное пособие «Электротехника и электроника. Часть I. Электрические цепи» посвящено вопросам теоретического анализа электрических цепей и их практической реализации и предназначено для организации и проведения всех видов занятий студентов, изучающих дисциплину «Электротехника и электроника».

В первой части учебного пособия рассматриваются три основные темы:

- электрические цепи постоянного тока;
- электрические цепи однофазного синусоидального тока;
- трехфазные электрические цепи.

Каждая глава учебного пособия содержит цель и задачи изучения раздела, теоретические положения, типовые задачи для самостоятельного решения и примеры практической реализации электрических схем, а также контрольные вопросы.

Структура каждой главы обеспечивает:

- глубокую и эффективную теоретическую и практическую подготовку бакалавров и специалистов в области электротехники;
- развитие технического мышления;
- приобретение знаний, необходимых для изучения специальных дисциплин, связанных с эксплуатацией электротехнического оборудования;
- овладение знаниями, умениями и навыками, необходимыми для квалифицированного и безопасного использования электротехнических устройств с целью реализации производственных процессов.

Такая структура позволяет формировать профессиональные компетенции ФГОС ВПО, а именно

- способность использовать инструментальные средства и системы измерения;
- навыки работы с электротехническими цепями и электротехническим оборудованием;
- способность должным образом оформлять, а также представлять результаты выполненной работы.

Перечисленные компетенции формируются через *умения*:

– использования теоретических методов расчета для решения практических задач;

– самостоятельной работы с электротехническим оборудованием;

– оформления отчета по результатам проделанной работы с помощью стандартных компьютерных программ;

а также через *владение*:

– навыками применения методов расчета электрических цепей и анализа результатов;

– навыками работы с электротехническим оборудованием и электроизмерительными приборами.

ГЛАВА 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Данная глава посвящена рассмотрению характеристик генерирующих и приемных устройств и изучению методов эквивалентных преобразований электрических схем с одним источником энергии.

В результате изучения данного раздела студенты должны:

- знать методы расчета электрических цепей с одним источником электрической энергии, а также характеристики источников и приемников электрической энергии;
- уметь выполнять простейшие электрические расчеты цепей с одним источником электрической энергии;
- иметь навыки проведения экспериментов с электрическими цепями.

1.1. Основные элементы электрических цепей постоянного тока и их характеристики

Совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, электрическом токе и электрическом напряжении, называется *электрической цепью*.

Основными элементами электрической цепи являются источники и приемники электрической энергии. Электрическая цепь является линейной, если ее элементы имеют параметры, не зависящие от тока и напряжения. Если хотя бы один элемент имеет параметры, зависящие от тока или напряжения, то цепь является нелинейной. К нелинейным элементам относятся лампы накаливания, диоды, стабилитроны, термо- и тензорезисторы и т.д.

Элементы электрических цепей характеризуют с помощью вольт-амперных характеристик $U = f(I)$, представляющих зависимость величины напряжения от тока в этом элементе.

Электрические цепи принято изображать в виде электрических схем: принципиальных, монтажных, схем замещения и др.

Для расчета цепей используются схемы замещения, которые отражают физические процессы преобразования энергии, происходящие в элементах этой цепи.

1.1.1. Параметры источников ЭДС

В соответствии с законом Ома в замкнутой электрической цепи, состоящей из источника ЭДС и нагрузки, ток определяется по формуле

$$I = \frac{E}{R_0 + R_H},$$

где E – ЭДС источника электрической энергии, В;

R_0 – внутреннее сопротивление источника, Ом;

R_H – сопротивление нагрузки, Ом.

Учитывая, что напряжение на нагрузке $U = R_H I$ и напряжение на внешних зажимах источника одинаковы, вольт-амперная характеристика источника будет иметь вид прямой, описываемой уравнением

$$U = E - R_0 I. \quad (1.1)$$

Эта характеристика называется *внешней характеристикой* источника ЭДС и отражает неидеальный характер этого источника электрической энергии.

На рис. 1.1 изображены схема замещения реального источника ЭДС (а) и его внешняя характеристика (б).

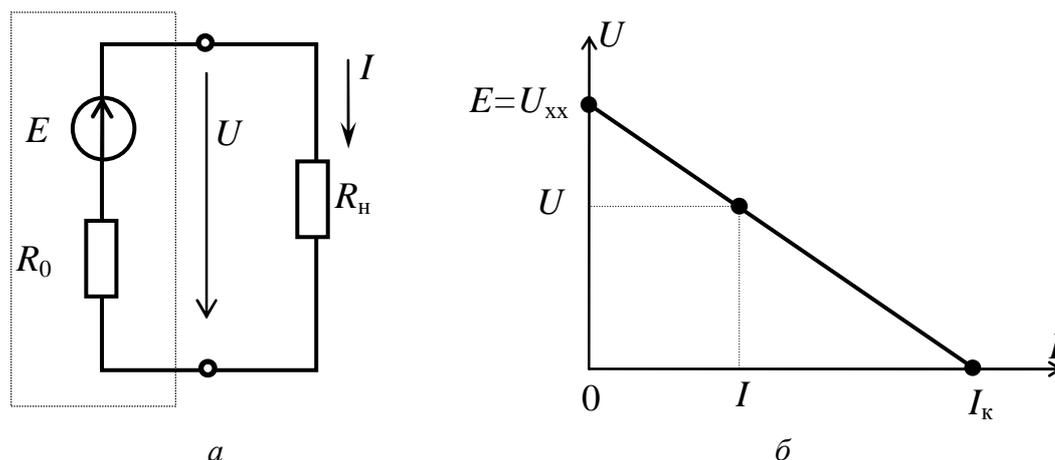


Рис. 1.1

Внешняя характеристика может быть построена по двум точкам:

– холостого хода ($E = U_{xx}$, $I_{xx} = 0$);

– короткого замыкания ($U_k = 0$, $I_k = E/R_0$).

Режим короткого замыкания, как правило, опасен для источника, поэтому практически внешнюю характеристику строят по точкам холостого хода и любого (произвольного) режима нагрузки. Внутреннее сопротивление источника вычисляют аналитически из выражения (1.1), описывающего его внешнюю характеристику.

1.1.2. Параметры приемников

На рис. 1.2, *а* представлена неразветвленная схема последовательного соединения линейного элемента – резистора R_1 и нелинейного элемента $R_2(I)$, вольт-амперные характеристики которых приведены на рис. 1.2, *б*. Последовательное соединение элементов (участков электрической цепи) – это электрическое соединение, в котором по всем рассматриваемым участкам электрической цепи возможен электрический ток только одного значения.

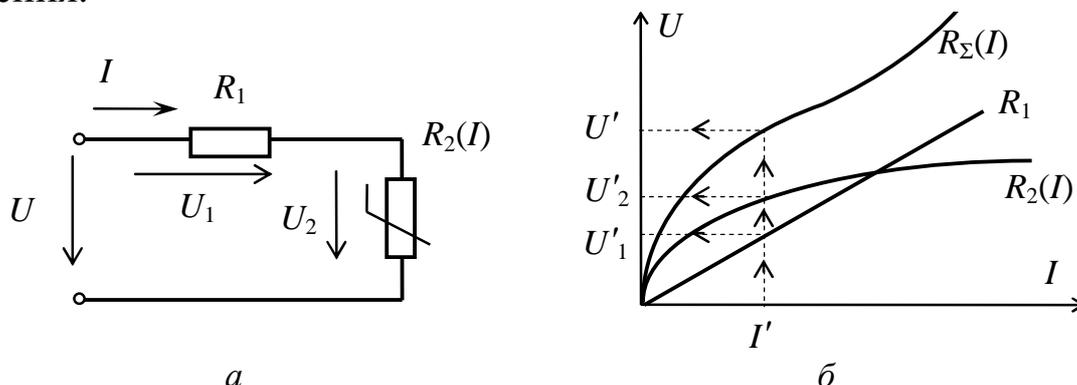


Рис. 1.2

На рис. 1.3, *а* и *б*, соответственно, представлены разветвленная схема параллельного соединения элементов и их вольт-амперные характеристики. Параллельное соединение элементов (участков электрической цепи) – это электрическое соединение, при котором рассматриваемые участки электрической цепи имеют общую пару узлов.

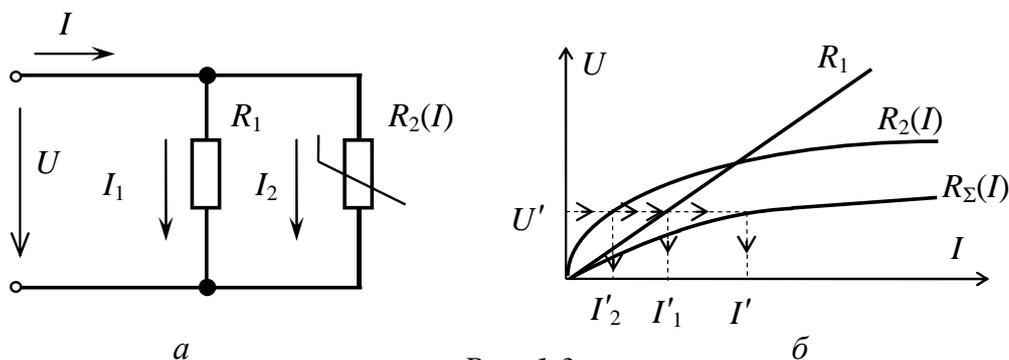


Рис. 1.3

Расчет нелинейных электрических цепей проводят графическим методом с использованием экспериментальных вольт-амперных характеристик элементов цепи.

При последовательном соединении элементов цепи (см. рис. 1.2) через них протекает общий ток. Согласно второму закону Кирхгофа приложенное напряжение распределяется между последовательно соединенными элементами (1.2), поэтому определение зависимости тока на выходе от значения приложенного напряжения производится суммированием соответствующих напряжений U'_1 и U'_2 при одном и том же значении тока I' :

$$U' = U'_1 + U'_2. \quad (1.2)$$

При параллельном соединении элементов цепи (см. рис. 1.3) указанную зависимость находят суммированием соответствующих токов I'_1 и I'_2 при одном и том же значении U' , поскольку в этом случае общим является напряжение, а входной ток, согласно первому закону Кирхгофа, распределяется между параллельными ветвями (1.3).

$$I' = I'_1 + I'_2. \quad (1.3)$$

Аналогично находят остальные координаты результирующих вольт-амперных характеристик.

1.1.3. Методы расчета электрических цепей с одним источником электрической энергии

Основной задачей расчета электрических цепей является определение токов, а далее – напряжений, мощностей отдельных участков электрической цепи по заданным величинам сопротивлений ветвей и значений ЭДС. Такая задача носит название «Задача анализа электрических цепей».

Для участка цепи, не содержащего источник энергии (рис. 1.4), связь между током и напряжением определяется законом Ома

$$I = \frac{U_{ab}}{R}.$$

Для участка цепи, содержащего источник энергии (например, рис. 1.5), согласно второму закону Кирхгофа

$$-U_{ab} + RI = E,$$

отсюда
$$I = \frac{U_{ab} + E}{R}.$$

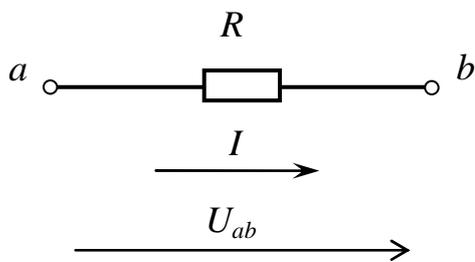


Рис. 1.4

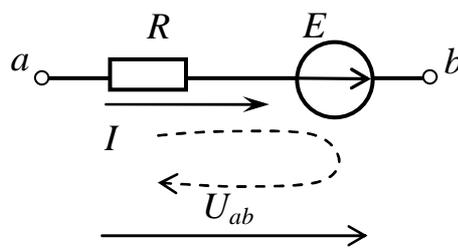


Рис. 1.5

Неразветвленная электрическая цепь характеризуется тем, что по всем ее участкам проходит один и тот же ток, а разветвленная – содержит один или несколько узлов, при этом на отдельных участках цепи – разные токи.

Расчет цепей с одним источником электрической энергии можно проводить с помощью *метода эквивалентных преобразований* или, как его еще называют, методом свертки.

Электрическая цепь с последовательным соединением n сопротивлений изображается при этом на схеме замещения одним эквивалентным сопротивлением

$$R_{\text{эКВ}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n.$$

Напряжения (падения напряжения) на сопротивлениях распределяются пропорционально этим сопротивлениям:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \dots = \frac{U_n}{R_n}.$$

Электрическую цепь с параллельным соединением n сопротивлений изображают на схеме замещения одним элементом с эквивалентным сопротивлением $R_{\text{эКВ}}$, которое определяется из выражения

$$\frac{1}{R_{\text{эКВ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

В частном случае при параллельном соединении двух сопротивлений эквивалентное сопротивление будет равно

$$R_{\text{эКВ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

а токи распределяются обратно пропорционально сопротивлениям ветвей, при этом

$$U = R_1 I_1 = R_2 I_2.$$

Эквивалентное сопротивление участка цепи, состоящего из n одинаковых параллельно соединенных сопротивлений R , определяется как

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R}{n}.$$

В некоторых случаях оказывается целесообразным преобразование сопротивлений, соединенных «треугольником», в эквивалентную «звезду» (рис. 1.6). При этом сопротивления лучей эквивалентной «звезды» определяются по формулам

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}};$$

$$R_2 = \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}};$$

$$R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}.$$

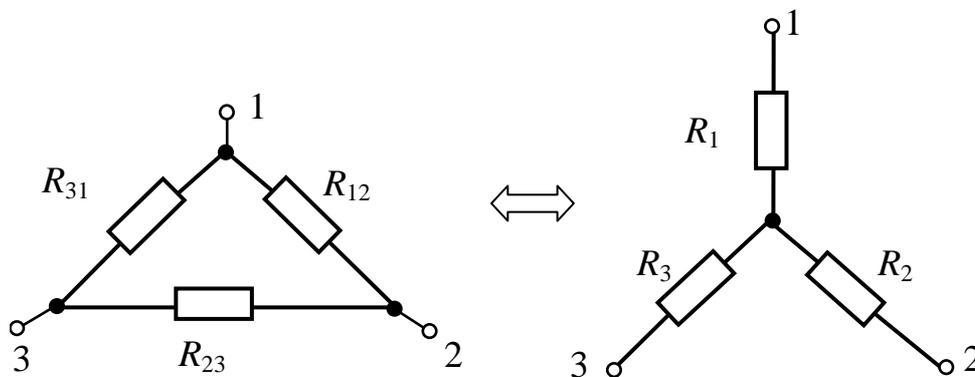


Рис. 1.6

В частном случае равенства сопротивлений ветвей «треугольника» сопротивления лучей «звезды» одинаковы и равны

$$R_Y = \frac{R_{\Delta}}{3}.$$

При преобразовании «звезды» в «треугольник» эквивалентные сопротивления ветвей «треугольника» определяются по формулам

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3},$$

$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1},$$

$$R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2}.$$

После преобразований исходная схема видоизменяется, появляются последовательные или параллельные соединения ветвей, что упрощает расчет эквивалентного сопротивления.

С дополнительными сведениями по данному разделу можно ознакомиться в [1 – 6].

1.2. Задачи для самостоятельного решения

Вопросы расчета электрических схем постоянного тока с использованием эквивалентных преобразований (пп. 1.1.3) рассматриваются в следующих задачах.

Задача 1. Генератор постоянного тока при токе 20 А имеет на зажимах напряжение 200 В, а при токе 60 А – 196 В. Определите внутреннее сопротивление и ЭДС источника электрической энергии. Постройте внешнюю характеристику источника.

Задача 2. Заданы параметры элементов электрической цепи E [В], R_i [Ом]. Определите токи в ветвях (рис. 1.7).

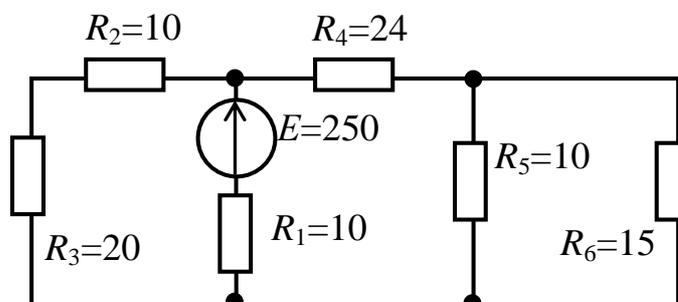


Рис. 1.7

Задача 3. Определите эквивалентное сопротивление цепи, если сопротивления заданы в Омах (рис. 1.8).

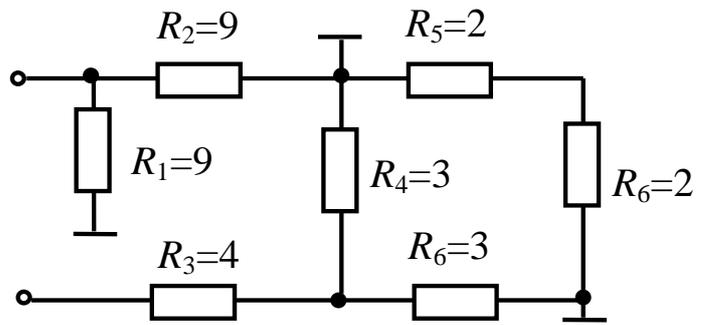


Рис. 1.8

Задача 4. Определите эквивалентное сопротивление цепи (рис. 1.9).

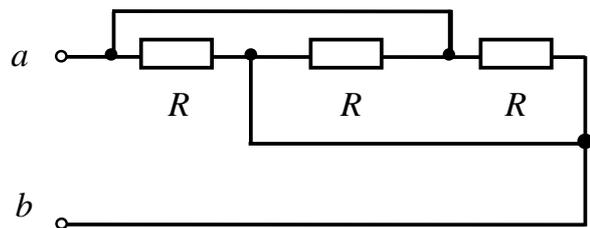


Рис. 1.9

Задача 5. В схеме с соединением элементов в виде моста заданы параметры электрической цепи E [В], R_i [Ом]. Определите ток I (рис. 1.10).

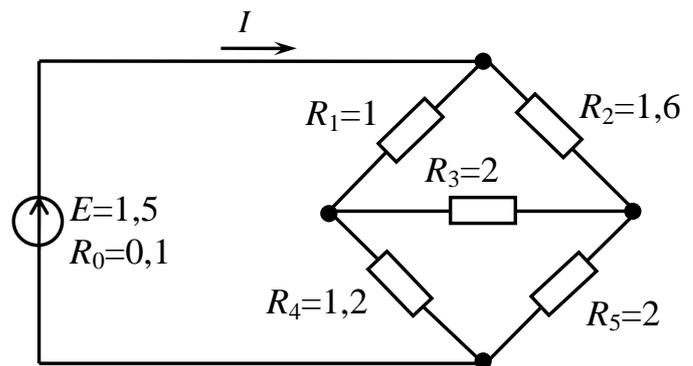


Рис. 1.10

Задача 6. Определите токи в ветвях и напряжение на входе цепи, если известны сопротивления участков цепи R_i [Ом], а показание ваттметра pW составляет $P = 320$ Вт (рис. 1.11).

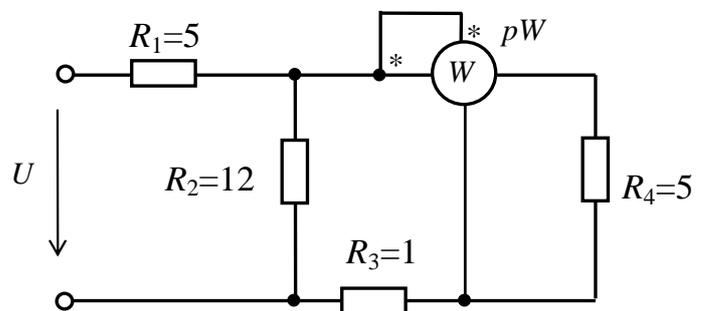


Рис. 1.11

1.3. Примеры практической реализации электрических цепей постоянного тока с одним источником энергии

Практическая реализация электрических цепей необходима для закрепления усвоения выше изложенных теоретических положений и может быть проведена на универсальном стенде при соблюдении требований, изложенных в Приложении.

Стенд должен содержать:

– автотрансформатор (АТ), обеспечивающий изменение напряжения в пределах $(0 \div 250)$, В, со встроенным вольтметром, расположенный в «Блоке включения»;

– мостовой выпрямитель ($UZ1$ или $UZ2$), расположенный в «Блоке включения», используемый в качестве преобразователя электрической энергии для питания цепи постоянного тока;

– переменный резистор сопротивлением 220 Ом, расположенный в «Блоке нагрузок», используемый в качестве нагрузки для исследования работы источника электрической энергии;

– постоянный резистор сопротивлением 20 Ом, расположенный в «Блоке нагрузок», используемый в качестве балластного сопротивления при исследовании работы источника электрической энергии;

– постоянный линейный резистор сопротивлением $R_{лэ} = 470$ Ом, расположенный в «Блоке нагрузок», используемый в качестве линейного сопротивления при исследовании работы приемников электрической энергии;

– блок ламповых реостатов (нелинейные сопротивления $R_{нэ}$ – лампы накаливания), расположенный в «Блоке нагрузок», используемый в качестве нелинейного сопротивления при исследовании работы приемников электрической энергии;

– электронные измерительные приборы с автоматическим выбором предела измерения и рода тока, расположенные в «Блоке измерительных приборов»:

а) pA – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А;

б) pV – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В.

Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят. Установите напряжение на АТ равным

нулю, для этого ручку регулятора напряжения поверните против часовой стрелки до упора.

С целью практической реализации электрических цепей с одним источником энергии предлагаются к рассмотрению следующие электрические схемы.

1. Электрическая цепь для определения параметров источника.

– Соберите цепь (рис. 1.12).

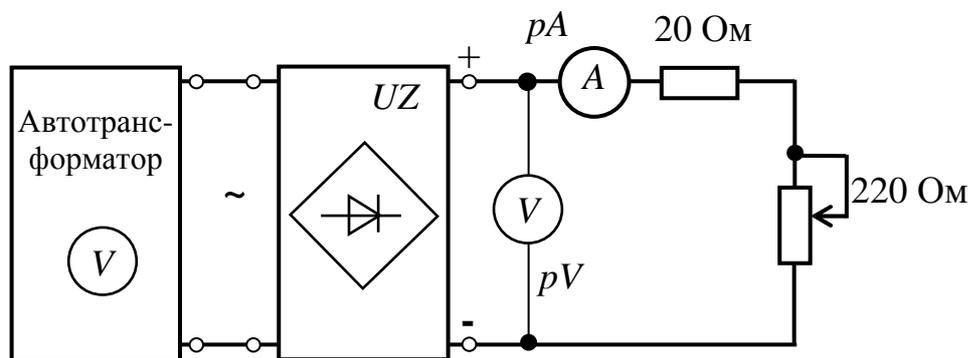


Рис. 1.12

– По указанию преподавателя с помощью автотрансформатора установите напряжение источника электрической энергии (30 ÷ 50), В. Изменяя величину нагрузочного сопротивления (220 Ом), получите экспериментальные данные для построения внешней характеристики $U = f(I)$, при этом ток не должен превышать 0,45 А.

Результаты эксперимента занесите в табл. 1.1.

Таблица 1.1

$U, В$					
$I, А$					

– Постройте внешнюю характеристику $U = f(I)$ источника.

– Определите параметры источника – ЭДС (E), внутреннее сопротивление (R_0) и ток короткого замыкания (I_K). При определении параметров источника ЭДС используйте выражение (1.1).

2. Электрические цепи для определения параметров приемников.

– Соберите цепь (рис. 1.13).

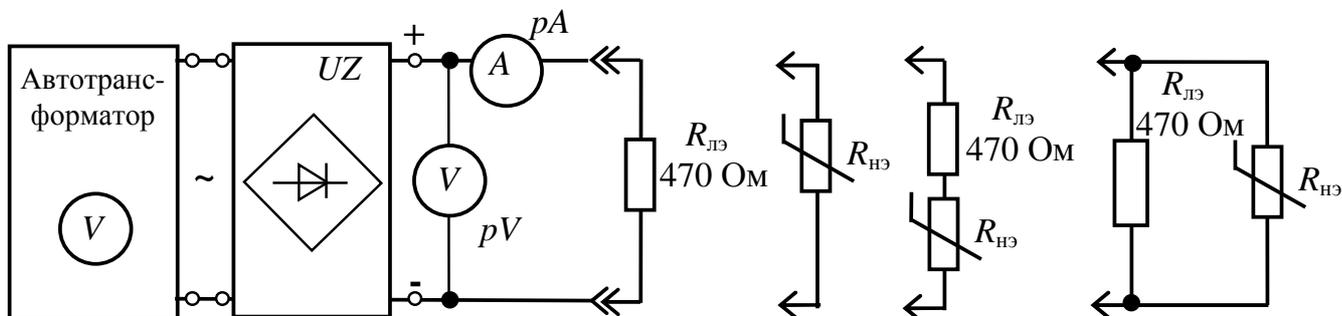


Рис. 1.13

– Изменяя напряжение источника от 0 до 100 В, получите экспериментальные данные для построения вольт-амперных характеристик линейного и нелинейного элементов, а также для случая их последовательного и параллельного соединений.

Результаты занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

	$U, В$	0	20	40	60	80	100
Линейный элемент	$I, А$						
Нелинейный элемент	$I, А$						
Последовательное соединение элементов	$I, А$						
Параллельное соединение элементов	$I, А$						

– Постройте в одной системе координат вольт-амперные характеристики $U = f(I)$ линейного и нелинейного приемников и их последовательного и параллельного соединений.

– Постройте теоретические вольт-амперные характеристики для последовательного и параллельного соединений линейного и нелинейного элементов, используя экспериментально полученные характеристики этих элементов. При построении теоретических суммарных вольт-амперных характеристик для последовательного и параллельного соединений линейного и нелинейного элементов используйте теоретические сведения пп. 1.1.2 (см. рис. 1.2, 1.3) и формулы (1.2) и (1.3).

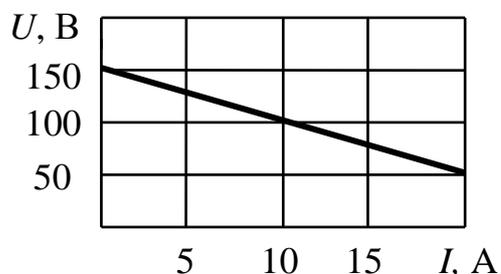
Контрольные вопросы

1. Укажите, какая из приведенных схем замещения относится к реальному источнику ЭДС.



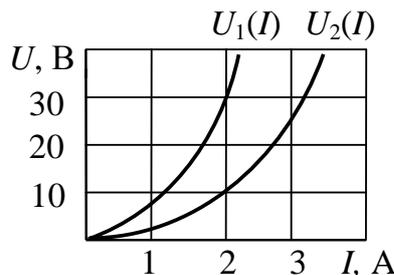
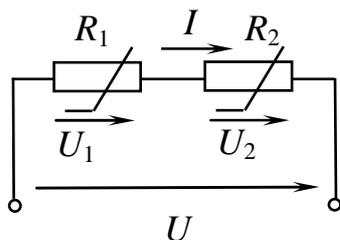
2. Какой вид имеют вольт-амперные характеристики идеальных источников ЭДС и тока?

3. По внешней характеристике источника определите его внутреннее сопротивление.



4. В чем особенность расчета нелинейных цепей?

5. Определите напряжение, приложенное к двум последовательно соединенным нелинейным сопротивлениям, если ток в цепи составляет 2 А.



ГЛАВА 2

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Данная глава посвящена изучению методов анализа разветвленных электрических цепей постоянного тока с двумя и более источниками электрической энергии (на основе законов Кирхгофа, метода междуузлов напряжения и метода эквивалентного генератора).

В результате изучения данного раздела студенты должны:

- знать методы расчета электрических цепей постоянного тока;
- уметь выполнять электрические расчеты цепей постоянного тока с двумя и более источниками электрической энергии различными методами;
- иметь навыки проведения экспериментов с электрическими цепями, выбора измерительных приборов и оценки получаемых результатов.

2.1. Основные методы расчета сложных электрических цепей постоянного тока

Основной задачей анализа электрических цепей является определение токов, а далее – напряжений, мощностей в ветвях электрической цепи по заданным параметрам элементов цепи. Возможна постановка задачи в виде определения других параметров при заданных токах в ветвях.

Все методы расчета основаны на законах Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа гласит: *алгебраическая сумма токов в ветвях, сходящихся в данном узле, равна нулю:*

$$\sum I_k = 0,$$

где k – порядковый номер ветви.

Токам, направленным к узлу, обычно присваивается знак «плюс», а направленным от него – «минус».

Второй закон Кирхгофа гласит: *алгебраическая сумма падений напряжения вдоль замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС этого же контура:*

$$\sum R_k I_k = \sum E_j,$$

где k – порядковый номер ветви;

j – порядковый номер ветви, содержащей источник ЭДС.

В каждую из сумм соответствующие слагаемые входят со знаком «плюс», если они совпадают с направлением обхода контура, и со знаком «минус», если они не совпадают с ним.

2.1.1. Расчет цепей с помощью непосредственного применения уравнений по законам Кирхгофа

Общее количество уравнений $n = N_B$, где N_B – общее число ветвей.

По первому закону составляют $n_I = (N_U - 1)$ уравнений, где N_U – число потенциальных узлов.

По второму закону составляют столько уравнений, сколько имеется замкнутых независимых контуров или $n_{II} = N_B - (N_U - 1)$.

Алгоритм расчета по законам Кирхгофа:

- а) определяется количество ветвей и узлов в схеме;
- б) определяются общее количество уравнений и количество уравнений по первому и второму законам Кирхгофа;
- в) произвольно выбираются направления токов в ветвях;
- г) выбираются потенциальные узлы, независимые контуры, а также условно положительные направления их обхода;
- д) составляются уравнения по первому и второму законам Кирхгофа;
- е) решается система уравнений;
- ж) проводится анализ результатов (истинное направление тока противоположно выбранному, если в результате расчета получилось его отрицательное значение);
- з) составляется и численно проверяется уравнение баланса мощностей с целью проверки правильности расчета.

2.1.2. Метод междуузлового напряжения

Данный метод используется для расчета цепей, содержащих только параллельные ветви, присоединенные к двум потенциальным узлам.

Если между двумя узлами (например, a и b) включено m ветвей, то напряжение между узлами U_{ab} определяется в соответствии с выражением (условно-положительное направление напряжения U_{ab} – от узла « a » к узлу « b ») при условии отсутствия источников тока:

$$U_{ab} = \frac{\pm \sum G_k E_k}{\sum G_j}, \quad (2.1)$$

где $G_k = 1/R_k$ – проводимость k -ветви с источником ЭДС, См;

$G_j = 1/R_j$ – проводимость j -ветви, См.

Знак слагаемого числителя узлового тока определяется следующим образом: если ЭДС источника электрической энергии направлена к узлу « a », слагаемое учитывается со знаком «+», в противоположном случае – со знаком «-».

Токи в ветвях электрической цепи находятся по закону Ома для активного или пассивного участков цепи с использованием найденного численного значения напряжения между двумя потенциальными узлами.

Алгоритм расчета по методу междуузлового напряжения:

- а) определяется междуузловое напряжение U_{ab} ;
- б) определяются токи в ветвях по закону Ома для активного или пассивного участков цепи;
- в) проводится анализ результатов и рассчитывается баланс мощностей.

2.1.3. Метод эквивалентного генератора (активного двухполюсника)

Метод эквивалентного генератора применяется для анализа электрических цепей в случае, когда требуется определить ток в одной ветви.

Согласно методу эквивалентного генератора (активного двухполюсника) любая сложная цепь, содержащая источники питания, по отношению к исследуемой ветви может быть заменена

эквивалентным генератором ЭДС с ЭДС $E_э$, равной напряжению холостого хода активного двухполюсника, и внутренним сопротивлением $R_э$, равным входному сопротивлению пассивного двухполюсника. Искомый ток тогда равен

$$I = \frac{E_э}{R_э + R} . \quad (2.2)$$

ЭДС эквивалентного генератора и его внутреннее сопротивление могут быть определены не только расчетным, но и экспериментальным путем. В последнем случае для определения $E_э$ и $R_э$ достаточно провести опыты холостого хода и короткого замыкания. При этом $E_э = U_{xx}$ на зажимах разомкнутой исследуемой ветви, а

$$R_э = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}, \quad (2.3)$$

где $I_{кз}$ – ток короткого замыкания исследуемой ветви.

Алгоритм расчета:

а) определяется $E_э = U_{xx}$, при этом исследуемая ветвь условно размыкается;

б) определяется $R_э$ – эквивалентное сопротивление сложной цепи по отношению к исследуемой ветви; при этом источники ЭДС закорачиваются, а ветви с источниками тока размыкаются;

в) определяется ток в исследуемой ветви по закону Ома для активного или пассивного участков цепи;

г) проводится анализ результатов.

2.1.4. Уравнение баланса мощностей

Взаимосвязь между суммарной мощностью источников и потребляемой мощностью в электрической цепи (уравнение баланса мощностей) определяется из уравнения

$$\sum P_{ист} = \sum P_{прием},$$

где $\sum P_{ист} = \sum (\pm E_i I_i)$ – алгебраическая сумма мощностей источников ЭДС (знак «+» берется, если направление тока совпадает с направлением ЭДС, а «-» – если противоположен), Вт;

$\sum P_{прием} = \sum R_i I_j^2$ – сумма мощностей потребителей, Вт;

I_j – ток, протекающий по ветви, содержащей R_i .

Баланс мощностей является методом проверки правильности определения токов в цепи при любом методе расчета.

С дополнительными сведениями по данному разделу можно ознакомиться в [4 – 8].

2.2. Задачи для самостоятельного решения

Вопросы расчета электрических цепей с несколькими источниками питания (пп. 2.1.1 – 2.1.4) рассматриваются в следующих задачах.

Задача 1. Определите показание вольтметра (рис. 2.1) и укажите, в каких режимах работают источники ЭДС (R [Ом], E [В]).

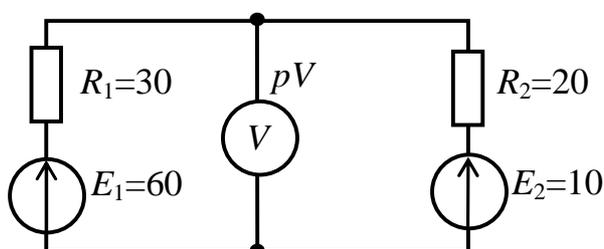


Рис. 2.1

Задача 2. Проведите анализ схем (рис. 2.2) с помощью законов Кирхгофа. Составьте уравнения баланса мощностей (R [Ом], E [В]).

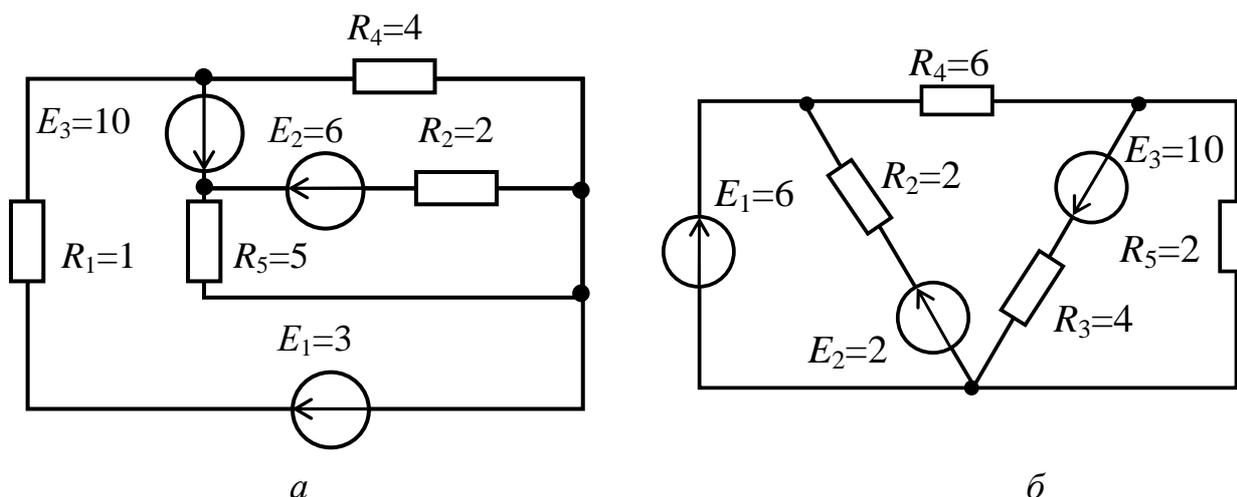


Рис. 2.2

При решении системы уравнений можно воспользоваться любым пакетом прикладных программ для математических расчетов (*MathCAD*, *MatLAB* и др.).

Задача 3. Определите токи в ветвях электрической цепи (рис. 2.3) (R [Ом], E [В]).

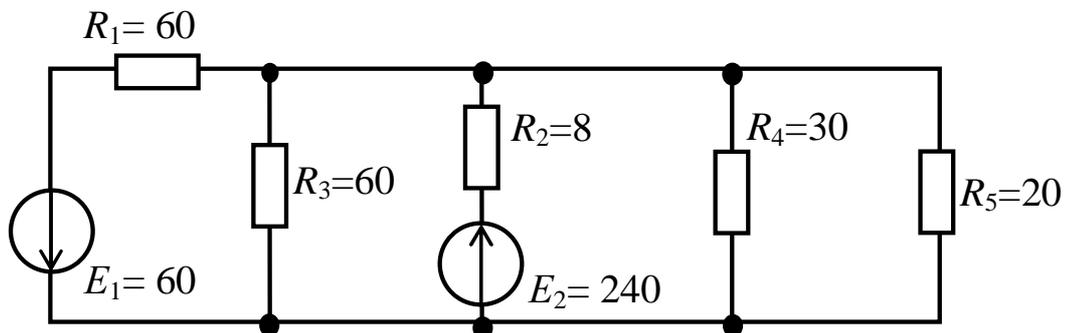


Рис. 2.3

Задача 4. Определите показание вольтметра в электрической цепи (рис. 2.4).

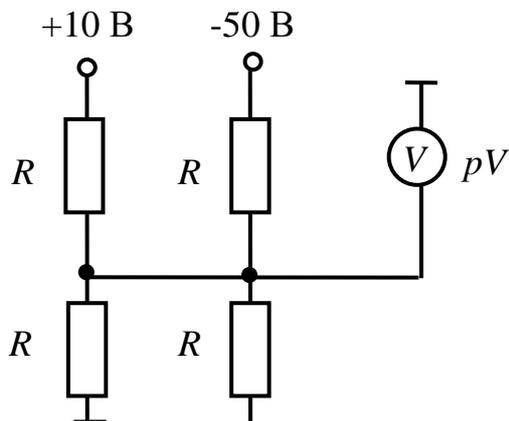


Рис. 2.4

Задача 5. Для электрической цепи (рис. 2.5) определите ток в ветви с резистором R_4 (R [Ом], E [В]).

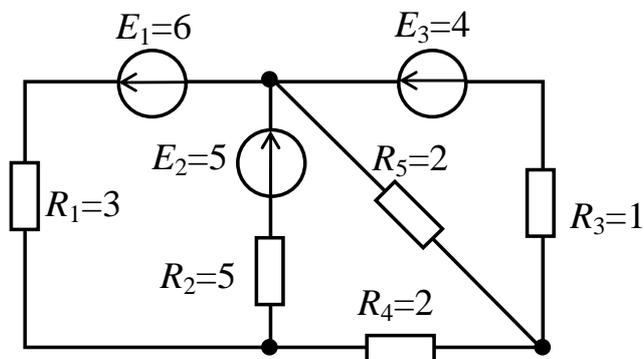


Рис. 2.5

Задача 6. В электрической цепи (рис. 2.6, а) определить ток в ветви с нелинейным элементом R_3 . Вольтамперная характеристика нелинейного элемента приведена на рис. 2.6, б (R [Ом], E [В]).

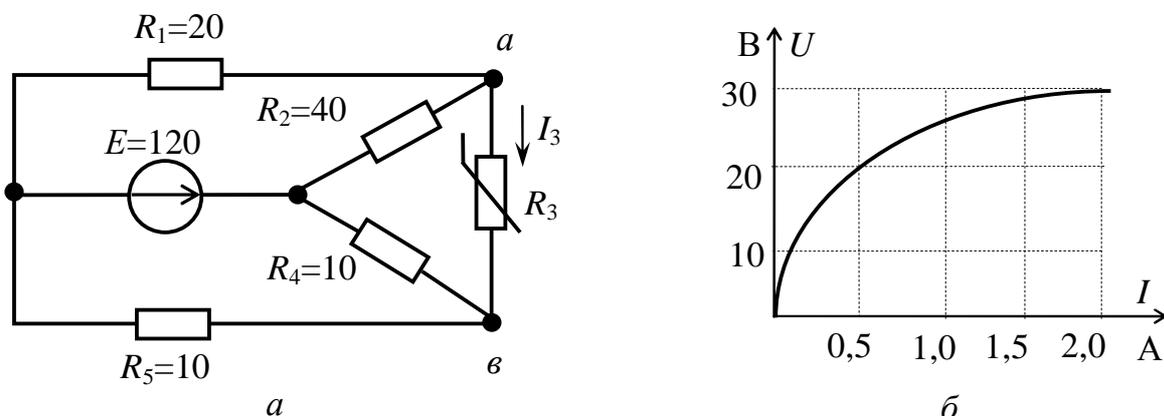


Рис. 2.6

2.3. Пример практической реализации сложной электрической цепи постоянного тока

Практическая реализация электрических цепей необходима для закрепления усвоения выше изложенных теоретических положений и может быть проведена на универсальном стенде при соблюдении требований, изложенных в Приложении.

Стенд должен содержать:

- источник постоянного напряжения БП-30 со встроенным электронным вольтметром, расположенным в «Блоке источников постоянного тока», используемый в исследуемой цепи в качестве источника ЭДС E_1 ;

- источник постоянного напряжения БП-15 со встроенным электронным вольтметром, расположенным в «Блоке источников постоянного тока», используемый в исследуемой цепи в качестве источника ЭДС E_2 (при подключении данного источника используются клеммы «плюс» и «земля»);

- резистор с сопротивлением 20 Ом, расположенный в «Блоке нагрузок», используемый в качестве нагрузки в одной из ветвей цепи;

- резисторы с сопротивлением 30 Ом, расположенные в «Блоке трансформаторов», используемые в качестве нагрузок в ветвях цепи;

- блок контроля токов, расположенный в «Блоке коммутации», позволяющий с помощью одного амперметра измерять токи в трех ветвях;

– электронные измерительные приборы с автоматическим выбором пределов измерения и рода тока, расположенные в «Блоке измерительных приборов»:

- а) pA – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А;
- б) pV – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В.

Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят. Установите напряжение на АТ равным нулю, для этого ручку регулятора напряжения поверните против часовой стрелки до упора.

С целью практической реализации сложной электрической цепи к рассмотрению предлагается электрическая схема (рис. 2.7).

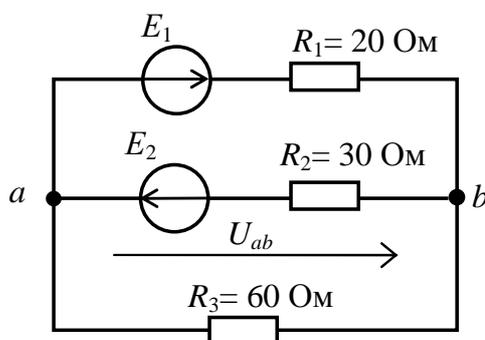


Рис. 2.7

1. Расчет параметров исследуемой электрической цепи.

– В электрической схеме (см. рис. 2.7) в соответствии с заданными преподавателем параметрами ЭДС ($E_1 = (20 \div 30)$, В; $E_2 = (5 \div 10)$, В) рассчитайте токи в ветвях:

а) с помощью законов Кирхгофа; при решении системы уравнений рекомендуется воспользоваться любым пакетом прикладных программ для математических расчетов (*MathCAD*, *MatLAB* и др.);

б) методом междуузлового напряжения; при определении междуузлового напряжения U_{ab} рекомендуется воспользоваться выражением (2.1)

– Рассчитайте ток в ветви с резистором R_3 (см. рис. 2.7) методом эквивалентного генератора.

– Результаты расчетов сведите в табл. 2.1.

Таблица 2.1

	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$U_{ab},$ В	$E_3,$ В	$R_3,$ Ом
Законы Кирхгофа				-	-	-
Метод междуузлового напряжения					-	-
Метод эквивалентного генератора	-	-		-		

- Сравните результаты расчетов токов разными методами.
- Составьте уравнение баланса мощностей.

2. Проверка соблюдения законов Кирхгофа.

– Соберите цепь (рис. 2.8).

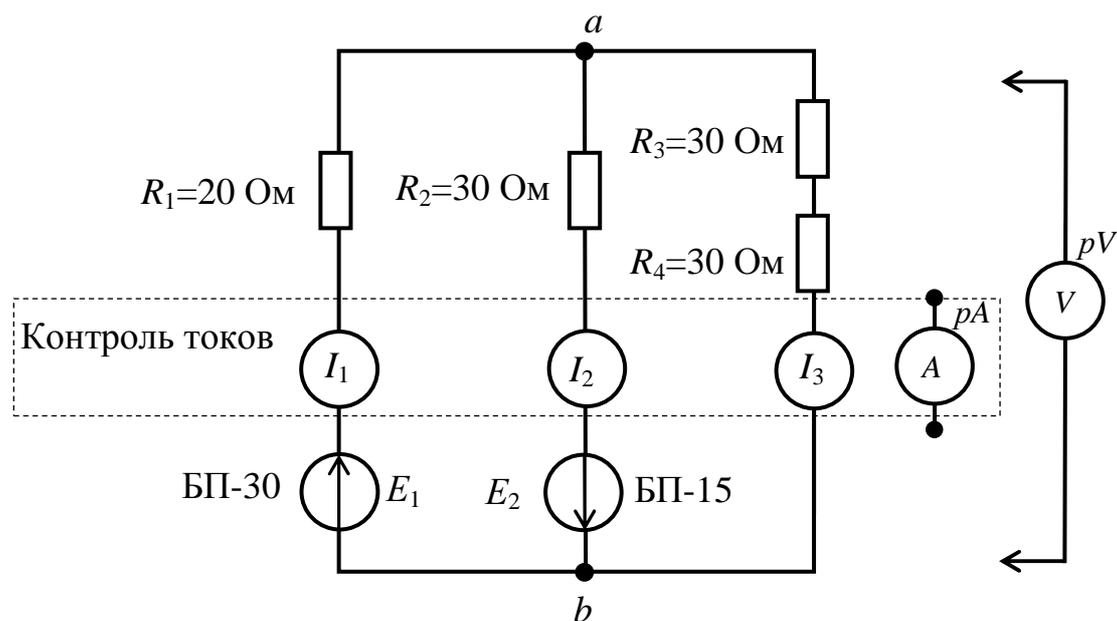


Рис. 2.8

- Экспериментально проверьте выполнение законов Кирхгофа. Установите заданные значения ЭДС источников. Измерьте токи в ветвях и падения напряжения на резисторах. Данные измерений занесите в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Измерено								Вычислено		
$E_1,$ В	$E_2,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$U_{R1},$ В	$U_{R2},$ В	$U_{R3},$ В	$\sum I_i$	$\sum R_i I_i$	$\sum E_j$

3. Проверка достоверности методов расчета сложных электрических цепей.

– Экспериментально проверьте возможность расчета токов в ветвях для цепи, имеющей два узла, методом междуузлового напряжения.

Измерьте напряжение U_{ab} при тех же значениях E_1 и E_2 . Данные измерений занесите в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Измерено			Вычислено по результатам опыта		
$E_1,$ В	$E_2,$ В	$U_{ab},$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А

– Экспериментально проверьте возможность расчета тока в одной ветви методом эквивалентного генератора.

Проведите опыты холостого хода и короткого замыкания для ветви с R_3 . Данные измерений занесите в табл. 2.4.

Таблица 2.4

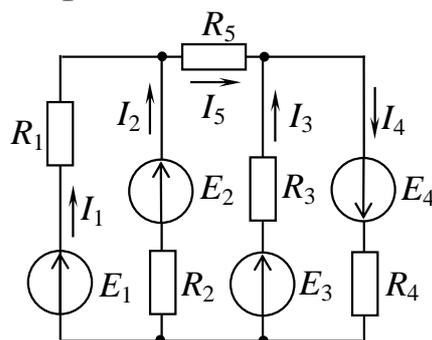
Измерено							Вычислено по результатам опытов		
Нагрузочный режим					Режим ХХ	Режим КЗ			
$E_1,$ В	$E_2,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$U_{abxx},$ В	$I_{кз},$ А	$E_э,$ В	$R_э,$ Ом	$I_3,$ А

При определении параметров эквивалентного генератора по результатам опытов рекомендуется воспользоваться выражениями (2.2) и (2.3), т.е. определить E_3 и R_3 , а также I_3 из опытов холостого хода и короткого замыкания. Сравните его с током I_3 , полученным путем прямого измерения.

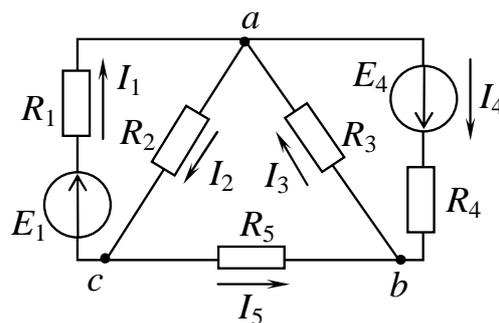
Контрольные вопросы

1. Как определяется количество уравнений, составляемых согласно первому и второму законам Кирхгофа?

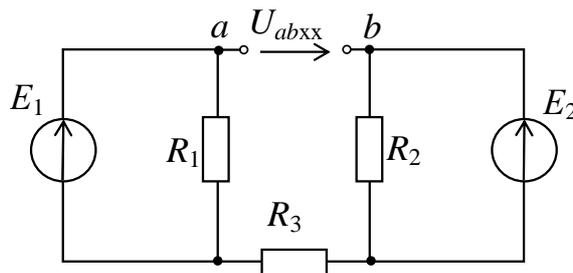
2. Определите ток I_4 , если токи в ветвях составляют $I_1 = 1$ А, $I_2 = 2$ А, $I_3 = 2$ А.



3. Составьте уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, содержащего ветви с R_1 , R_4 , R_5 .



4. Определите напряжение U_{abxx} при расчете по методу эквивалентного генератора, если $E_1 = 20$ В, $E_2 = 50$ В, $R_1 = R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 20$ Ом.



5. Почему метод эквивалентного генератора удобно применять при расчете нелинейных цепей?

ГЛАВА 3

АНАЛИЗ ОДНОФАЗНЫХ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С *RL*- И *RC*-ПРИЕМНИКАМИ

Данная глава посвящена изучению методов анализа неразветвленных электрических цепей синусоидального тока с *RL*- и *RC*-приемниками.

В результате изучения данного раздела студенты должны:

- знать основные фазовые соотношения между токами и напряжениями для цепей синусоидального тока с различными по характеру приемниками;
- уметь выполнять электрические расчеты в цепях синусоидального тока, содержащих активные, индуктивные и емкостные элементы;
- иметь навыки экспериментального определения параметров цепи синусоидального тока по показаниям электроизмерительных приборов.

3.1. Основные параметры и характеристики неразветвленных электрических цепей синусоидального тока с *RL*- и *RC*-приемниками

3.1.1. Методы представления электрических синусоидальных величин

В электротехнике приходится иметь дело с переменным током, величина которого изменяется во времени по синусоидальному закону.

Синусоидальные функции времени могут быть представлены тригонометрической формой записи, вращающимися радиус-векторами (рис. 3.1, *а*) и комплексными числами.

Тригонометрическая форма записи тока как функции времени, изображенной на рис. 3.1, *б*, представляется выражением

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

где I_m – амплитудное значение, А;

ω – угловая или круговая частота, характеризующая скорость изменения фазового угла, с⁻¹;

t – текущее значение времени, с;

ψ_i – начальная фаза, рад.

Круговая частота связана с циклической частотой f и периодом T соотношением

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T} [\text{с}^{-1}].$$

На рис. 3.1, *а* изображена та же самая функция в виде *вращающегося радиус-вектора* \vec{I}_m , длина которого равна амплитуде, угол между вектором и осью абсцисс для момента времени $t = 0$ представляет начальную фазу ψ_i . Проекция вращающегося радиус-вектора на ось ординат определяет мгновенное значение синусоидальной величины.

В электротехнике за положительное направление вращения векторов принимают направление против часовой стрелки.

Кроме мгновенных и амплитудных значений переменных синусоидальных величин очень важной характеристикой является среднее квадратичное значение тока – *действующее значение тока*

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

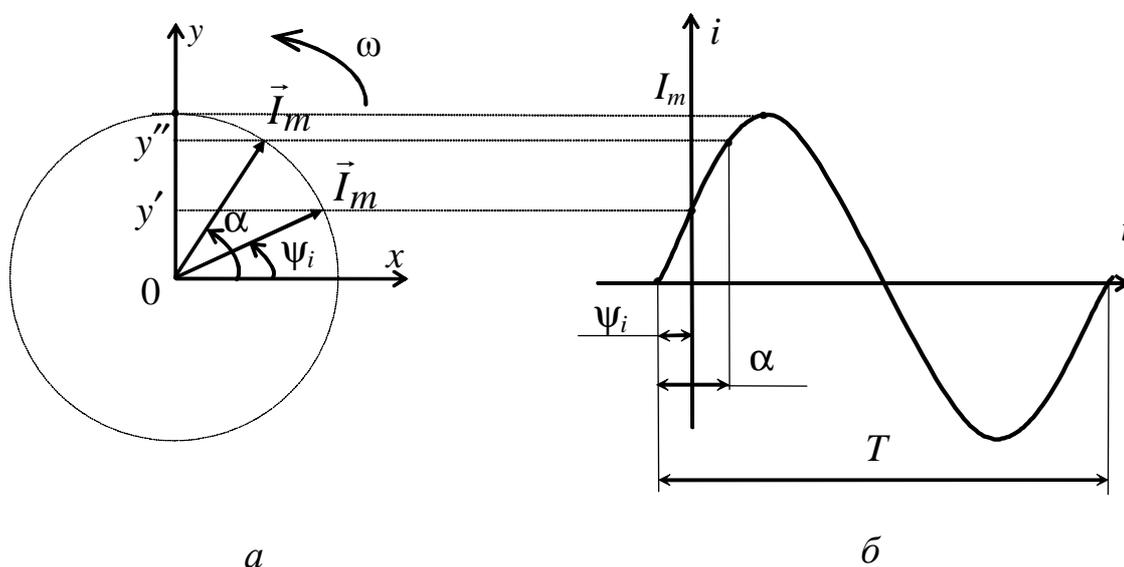


Рис. 3.1

Действующее значение переменного тока численно равно постоянному току, который в сопротивлении R за время периода T выделяет столько же тепла, сколько при тех же условиях выделяет переменный ток.

Соотношения между амплитудами и действующими значениями синусоидальных величин:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Большинство электроизмерительных приборов в электрических цепях синусоидального тока показывают действующие значения. Синусоидальные функции времени изображаются также *комплексными числами*, что, по сути, представляет собой

вращающийся радиус-вектор на комплексной плоскости (рис. 3.2). Метод комплексных чисел позволяет графические операции над векторами заменить алгебраическими действиями над комплексными числами. Комплексные числа чаще записываются для действующих значений синусоидальных величин.

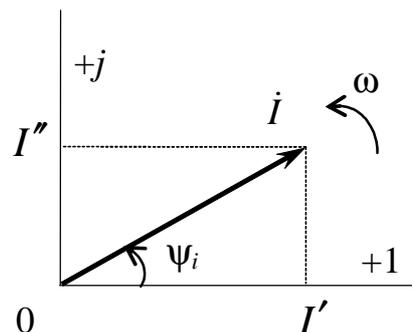


Рис. 3.2

Используются три формы записи комплексных чисел:

а) алгебраическая $\dot{I} = I' + jI''$,

где I' – действительная часть; I'' – мнимая часть,

б) показательная $\dot{I} = Ie^{j\psi_i}$;

в) тригонометрическая $\dot{I} = I(\cos\psi_i + j\sin\psi_i)$,

где I – модуль комплексного числа;

ψ_i – аргумент комплексного числа.

Переход от алгебраической формы записи комплексного числа к показательной производится с использованием следующих выражений:

$$I = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2},$$

$$\psi_i = \arctg \frac{I''}{I'} \pm \pi n,$$

где n – коэффициент, учитывающий периодичность функции.

Обратный переход осуществляется в соответствии с формулой Эйлера

$$e^{j\psi_i} = \cos \psi_i + j \sin \psi_i.$$

Сложение и вычитание комплексных чисел удобно производить в алгебраической форме, а умножение и деление – в показательной.

3.1.2. Последовательное соединение резистора и индуктивной катушки

На рис. 3.3 показана схема замещения реальной индуктивной катушки, которая содержит R и L -элементы.

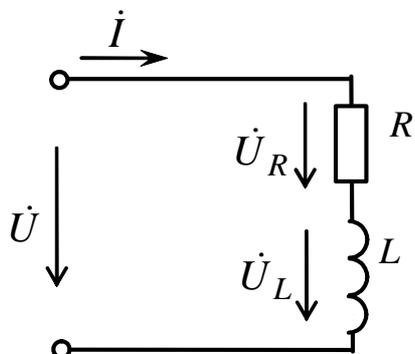


Рис. 3.3

Для *резистивного элемента* начальная фаза напряжения \dot{U}_R совпадает с начальной фазой тока:

$$\dot{U}_R = RI. \quad (3.1)$$

В этом элементе происходит безвозвратное (активное) потребление мощности – энергия выделяется в виде тепла и рассеивается в окружающей среде (необратимый процесс).

Напряжение \dot{U}_L на *индуктивном элементе* опережает ток I по фазе на угол 90° из-за возможности катушки накапливать энергию магнитного поля и создавать ЭДС самоиндукции при синусоидальном токе

$$\dot{U}_L = j\omega LI = jX_L I, \quad (3.2)$$

где $X_L = \omega L = 2\pi fL$ – индуктивное сопротивление, Ом.

Разность фаз между током и напряжением обозначается φ . На векторной диаграмме угол φ между вектором тока и вектором напряжения всегда направлен от вектора тока к вектору напряжения. Если направление стрелки угла φ совпадает с направлением вращения векторов ω , то знак угла принимается положительным, если направление противоположно – отрицательным. Для индуктивного элемента $\varphi = 90^\circ$.

Напряжение, приложенное к катушке, в соответствии со вторым законом Кирхгофа будет иметь две составляющие – активную и индуктивную

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L = RI + jX_L I. \quad (3.3)$$

Активная мощность (P , Вт) может быть определена по выражению

$$P = UI \cos \varphi = U_R I = RI^2. \quad (3.4)$$

Реактивная (индуктивная) мощность (Q , вар) характеризует скорость поступления энергии в магнитное поле катушки и возврат ее обратно источнику (обратимый процесс):

$$Q_L = UI \sin \varphi = U_L I = X_L I^2, Q_L > 0. \quad (3.5)$$

Полное комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = (R + jX_L) = Ze^{j\varphi}, \quad (3.6)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ – модуль полного комплексного сопротивления цепи, Ом;

$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R}$ – разность фаз между током и напряжением, $\varphi > 0$.

На рис. 3.4 представлена векторная диаграмма тока и напряжений, а также полученные из нее треугольники сопротивлений и мощностей.

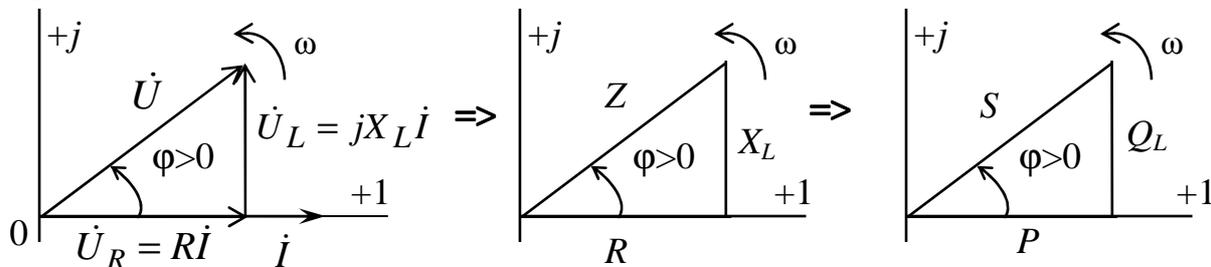


Рис. 3.4

Модуль полной комплексной мощности (S , ВА):

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q_L^2}. \quad (3.7)$$

3.1.3. Последовательное соединение резистора и конденсатора

На рис. 3.5 показана схема замещения последовательного соединения резистора и конденсатора.

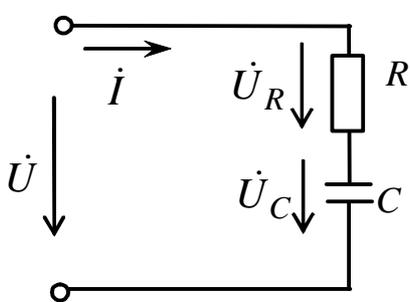


Рис. 3.5

В ёмкостном элементе напряжение \dot{U}_C отстает от тока \dot{I} на угол 90° ($\varphi = -90^\circ$) из-за того, что конденсатор обладает возможностью накапливать энергию электрического поля:

$$\dot{U}_C = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I} = -jX_C \dot{I}, \quad (3.8)$$

где $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$ – емкостное сопротивление, Ом.

Напряжение, приложенное к цепи, имеет активную и емкостную составляющие

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C = RI - jX_C I. \quad (3.9)$$

Реактивная (емкостная) мощность характеризует скорость поступления энергии в электрическое поле конденсатора и возврат ее источнику (обратимый процесс):

$$Q_C = UI \sin \varphi = U_C I = X_C I^2, \quad Q_C < 0. \quad (3.10)$$

Полное комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = (R - jX_C) = Ze^{j\varphi}, \quad (3.11)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ – модуль полного комплексного сопротивления, Ом;

$\varphi = \text{arctg} \frac{-X_C}{R}$ – угол сдвига фаз между током и напряжением, рад.

На рис. 3.6 представлены векторная диаграмма тока и напряжений, а также полученные из нее треугольники сопротивлений и мощностей.

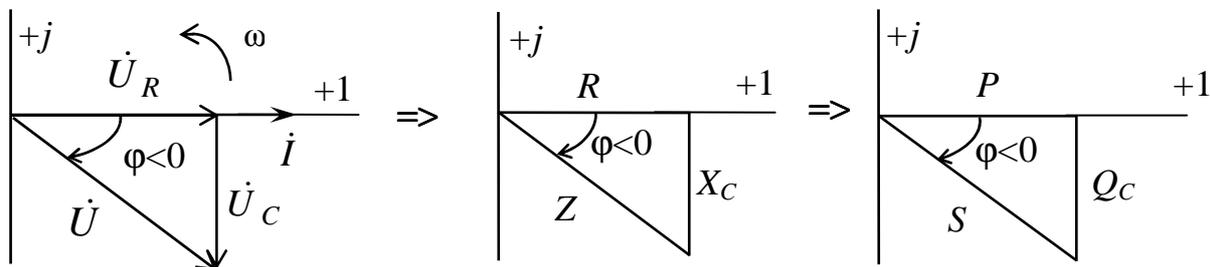


Рис. 3.6

Коэффициентом мощности электрической цепи называется скалярная величина, равная отношению активной мощности P к полной мощности S :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}. \quad (3.12)$$

Коэффициент мощности показывает, какая часть электрической энергии необратимо преобразуется в другие виды энергии (тепловую, механическую, химическую и пр.), поэтому является важным технико-экономическим показателем работы цепи.

С дополнительными сведениями по данному разделу можно ознакомиться в [1, 3 – 7].

3.2. Задачи для самостоятельного решения

Вопросы расчета неразветвленных электрических цепей синусоидального тока с RL - и RC -приемниками (пп. 3.1.1 – 3.1.3) рассматриваются в следующих задачах.

Задача 1. Заданы графики $u(t)$ и $i(t)$ с амплитудами $U_m = 141$ В; $I_m = 2,82$ А (рис. 3.7).

Запишите функции в комплексной показательной и тригонометрической формах. Определите полное комплексное сопротивление.

Постройте электрическую схему замещения при $f = 50$ Гц, векторную диаграмму тока и напряжения.

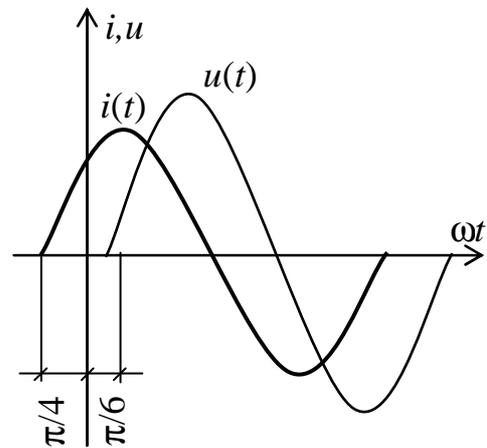


Рис. 3.7

Задача 2. Запишите в алгебраической и показательной формах выражения для полного комплексного сопротивления индуктивной катушки с параметрами $R_k = 3$ Ом, $L_k = 0,0125$ Гн, $f = 50$ Гц.

Постройте треугольник сопротивлений. Определите полную и активную мощности.

Задача 3. К цепи (рис. 3.8) приложено напряжение $u = 282\sin(314t + 20^\circ)$, В. Параметры цепи: $R = 60$ Ом, $C = 39,8$ мкФ. Определите мгновенное значение тока, потребляемые активную и полную мощности. Постройте векторную диаграмму тока и напряжений.

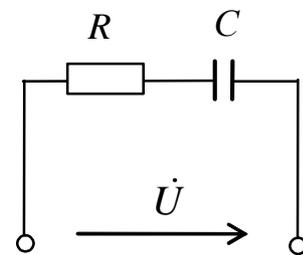


Рис. 3.8

Задача 4. По показаниям приборов определите параметры: R , L , φ , Q , S катушки (рис. 3.9), если $p_A \Rightarrow 0,2$ А, $p_V \Rightarrow 3$ В, $p_W \Rightarrow 0,36$ Вт. Частота приложенного напряжения $f = 300$ Гц.

Постройте векторную диаграмму тока и напряжений.

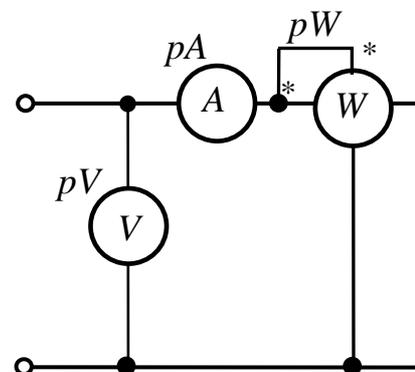


Рис. 3.9

3.3. Примеры практической реализации неразветвленных электрических цепей синусоидального тока с RL - и RC -приемниками

Практическая реализация электрических цепей необходима для закрепления усвоения выше изложенных теоретических положений и может быть проведена на универсальном стенде при соблюдении требований, изложенных в Приложении.

Стенд должен содержать:

– автотрансформатор (АТ), обеспечивающий изменение напряжения ($0 \div 250$), В, со встроенным вольтметром, расположенный в «Блоке включения»;

– индуктивную катушку с регулируемой индуктивностью $L8$, расположенную в «Блоке индуктивностей»;

– батарею конденсаторов от $0,5$ мкФ до 62 мкФ, расположенную в «Блоке конденсаторов»;

– переменный резистор с сопротивлением 220 Ом, расположенный в «Блоке нагрузок»;

– электронные измерительные приборы с автоматическим выбором пределов измерения и рода тока, расположенные в «Блоке измерительных приборов»:

а) pA – амперметр с верхним пределом измерения $2,5$ А;

б) pV – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В;

в) pW – ваттметр с пределами измерений по току ($0,01 \div 1$), А и по напряжению ($5 \div 250$), В, который является универсальным прибором и измеряет одновременно величины тока, напряжения, мощности и угла сдвига фаз на участке, к которому подключен.

Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят. Установите напряжение на АТ равным нулю, для этого ручку регулятора напряжения поверните против часовой стрелки до упора.

С целью практической реализации неразветвленных электрических цепей синусоидального тока с RL - и RC -приемниками предлагаются к рассмотрению следующие электрические схемы.

1. Электрическая цепь синусоидального тока для определения параметров активно-индуктивных приемников.

– Соберите электрическую цепь (рис. 3.10).

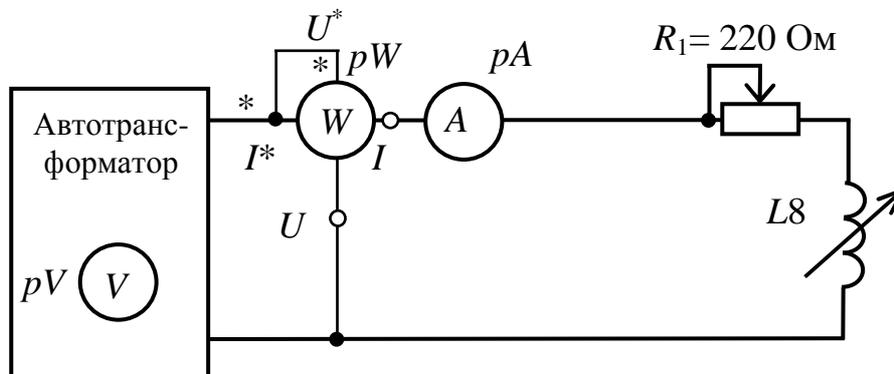


Рис. 3.10

– Включите стенд и установите входное напряжение $U = (20 \div 40)$, В по указанию преподавателя.

– Произведите измерения в цепи RL при различных значениях R и L .

В первой группе измерений ($L = \text{const}$) сердечник индуктивности $L8$ должен быть полностью разомкнут, для этого необходимо многооборотный регулятор индуктивности повернуть против часовой стрелки до упора. При выборе диапазона изменения сопротивления R следите, чтобы величина тока не превышала 0,4 А.

Во второй группе измерений ($R = \text{const}$) при выборе диапазона изменения индуктивности L регулируемое сопротивление 220 Ом необходимо установить приблизительно в среднее положение.

Результаты измерений занесите в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Измерено		Вычислено										
Нагрузка		U , В	I , А	P , Вт	φ град	R , Ом	X_L , Ом	L , Гн	Z , Ом	$\cos \varphi$	Q_L вар	S ВА
$L = \text{const}$	R_1											
	R_2											
	R_3											
$R = \text{const}$	L_1											
	L_2											
	L_3											

При расчете основных параметров цепи следует воспользоваться методом трех приборов – показаниями амперметра (I), вольтметра ($U_{\text{вх}}$) и ваттметра (P) или фазометра (φ).

Полное сопротивление Z определяется по закону Ома из показаний вольтметра и амперметра

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

Активное сопротивление R определяется по показаниям амперметра и ваттметра с использованием выражения (3.4):

$$R = \frac{P}{I^2}.$$

Для активно-индуктивной цепи сопротивление R состоит из сопротивления резистора R_1 и собственного сопротивления реальной катушки R_k ($R = R_1 + R_k$). для исследуемой катушки $R_k = 8$ Ом.

Индуктивное сопротивление и индуктивность катушки $X_L = \omega L = 2\pi f L$ определяются из выражения (3.6) при известных R и Z .

Полная мощность S и реактивная мощность Q определяются для активно-индуктивной цепи соответственно из выражений (3.5) и (3.7).

Коэффициент мощности цепи $\cos\varphi$ определяется из выражения (3.12).

– Постройте в масштабе семейства треугольников сопротивлений и треугольников мощностей для каждой из групп измерений, запишите в комплексной форме полные сопротивления. Построения треугольников сопротивлений и треугольников мощностей выполняются в соответствии с выражениями (3.1) – (3.3) и рис. 3.4.

– Постройте в масштабе векторную диаграмму тока и напряжений в цепи RL для одного из измерений. При построении векторной диаграммы необходимо выполнить расчет напряжений на отдельных элементах в соответствии с выражениями (3.1) – (3.3). Векторная диаграмма тока и напряжений должна быть изображена с учетом выбранных масштаба тока и масштаба напряжения.

2. Электрическая цепь синусоидального тока для определения параметров активно-емкостных приемников.

– Соберите электрическую цепь (рис. 3.11).

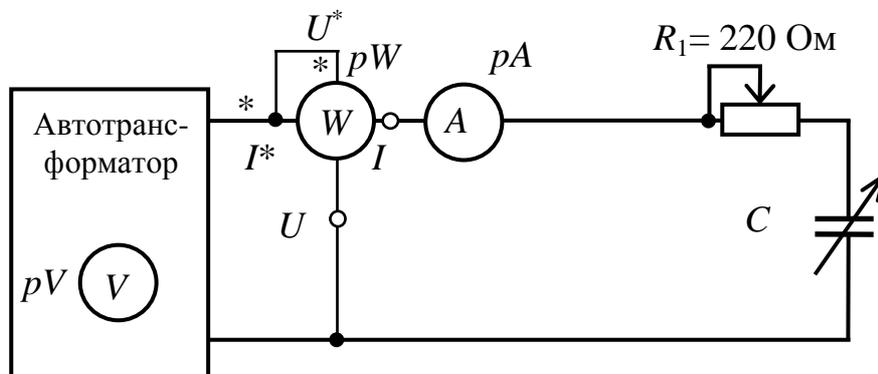


Рис. 3.11

– Произведите измерения в цепи RC при различных значениях R и C .

В первой группе измерений ($C = \text{const}$) емкость установите по указанию преподавателя в пределах $(20 \div 40)$, мкФ.

Во второй группе измерений ($R = \text{const}$) положение движка реостата установите приблизительно в среднее положение, первоначальную емкость – из диапазона $(10 \div 15)$, мкФ, шаг изменения емкости выберите не менее 10 мкФ.

Результаты измерений занесите в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Измерено		Вычислено									
Нагрузка		U , В	I , А	P , Вт	φ град	R , Ом	X_C , Ом	Z , Ом	$\cos \varphi$	Q вар	S ВА
$C = \text{const}$	R_1										
	R_2										
	R_3										
$R = \text{const}$	C_1										
	C_2										
	C_3										

При расчете основных параметров цепи следует воспользоваться методом трех приборов – показаниями амперметра (I), вольтметра ($U_{\text{вх}}$) и ваттметра (P) или фазометра (φ).

Полное сопротивление Z определяется по закону Ома из показаний вольтметра и амперметра

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

Активное сопротивление R определяется по показаниям амперметра и ваттметра с использованием выражения (3.4):

$$R = \frac{P}{I^2}.$$

Для активно-емкостной цепи активным сопротивлением конденсатора, которое характеризует потери на утечку заряда, можно пренебречь и активным сопротивлением цепи считать только сопротивление R_1 .

Емкостное сопротивление $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$ и емкость

конденсатора определяются из выражения (3.11) при известных R и Z .

Полная мощность S и реактивная мощность Q определяются для активно-емкостной цепи соответственно из выражений (3.7) и (3.10).

Коэффициент мощности цепи $\cos\varphi$ определяется из выражения (3.12).

– Постройте в масштабе семейства треугольников сопротивлений и треугольников мощностей для каждой из групп измерений, запишите в комплексной форме полные сопротивления. Построения треугольников сопротивлений и треугольников мощностей выполняются в соответствии с выражениями (3.8), (3.9) и рис. 3.6.

– Постройте в масштабе векторную диаграмму тока и напряжений в цепи RC для одного из измерений. При построении векторной диаграммы необходимо выполнить расчет напряжений на отдельных элементах в соответствии с выражениями (3.8) и (3.9). Векторная диаграмма тока и напряжений должна быть изображена с учетом выбранных масштаба тока и масштаба напряжения.

Контрольные вопросы

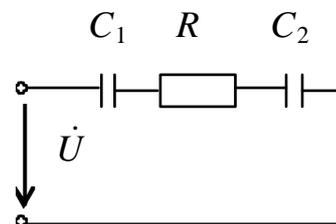
1. В каких случаях применяются алгебраическая, тригонометрическая и показательная формы записи комплексов тока и напряжения?

2. Можно ли по знаку мнимой составляющей полного комплексного сопротивления определить характер реактивного сопротивления?

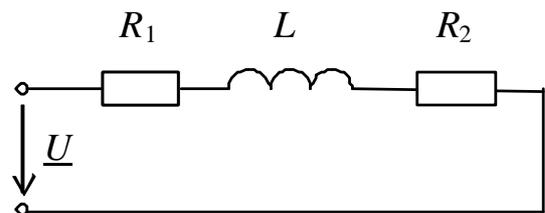
3. Каким образом влияет величина активного сопротивления цепи на разность фаз между током и напряжением?

4. Объясните физический смысл активной, реактивной и полной мощностей. Назовите их единицы измерения.

5. Определите напряжение на индуктивном элементе схемы, если $R = 10 \text{ Ом}$, $C_1 = 100 \text{ мкФ}$, $C_2 = 20 \text{ мкФ}$, $U = 24 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$.



6. Определите модуль полного комплексного сопротивления цепи, постройте векторную диаграмму тока и напряжений, если $U = 220 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $L = 0,2 \text{ Гн}$, $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 40 \text{ Ом}$.



7. Определите полное комплексное сопротивление участка цепи, если $i = 1,35 \sin(314t + \pi/10)$, А, $u = 245 \sin(314t - \pi/20)$, В.

8. Определите напряжение питания цепи, содержащей последовательно соединенные резистивный и емкостной элементы, если известны напряжения на элементах цепи:

$$u_R = 200 \sin(314t - \pi/2), \text{ В}, u_C = 145 \sin(314t - \pi), \text{ В}.$$

ГЛАВА 4

НЕРАЗВЕТВЛЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Данная глава посвящена изучению режимов работы однофазной электрической цепи синусоидального тока при последовательном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

В результате изучения данного раздела студенты должны:

– знать основы расчета электрических цепей синусоидального тока, основные фазовые соотношения для неразветвленных цепей, а также основные признаки и условия возникновения резонанса напряжений;

– уметь выполнять простейшие расчеты электрических цепей синусоидального тока с последовательным соединением элементов;

– иметь навыки сборки электрических цепей, выбора средств и методов электрических измерений в неразветвленных цепях и обработки результатов эксперимента.

4.1. Анализ работы неразветвленных электрических цепей синусоидального тока

4.1.1. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений

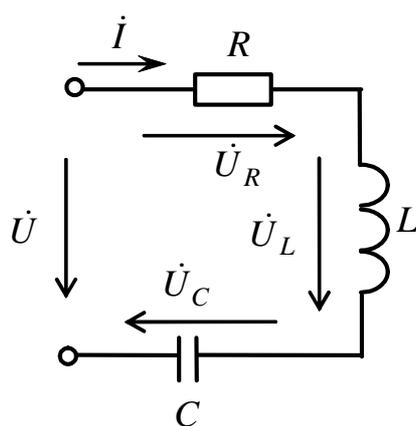


Рис. 4.1

При расчете неразветвленной электрической цепи синусоидального тока с последовательно соединенными R -, L - и C -элементами (рис. 4.1) пользуются уравнениями, записанными на основе второго закона Кирхгофа. В комплексной форме это уравнение имеет вид

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C. \quad (4.1)$$

Учитывая, что напряжение \dot{U}_R на активном сопротивлении совпадает по фазе с током \dot{I} , напряжение \dot{U}_L на индуктивном элементе опережает,

а напряжение \dot{U}_C на емкостном элементе отстает от тока \dot{I} на $\pi/2$, можно получить

$$\dot{U}_R = R\dot{I}, \quad (4.2)$$

$$\dot{U}_L = jX_L\dot{I}, \quad (4.3)$$

$$\dot{U}_C = -jX_C\dot{I}, \quad (4.4)$$

где $X_L = \omega L$, $X_C = 1/\omega C$, $\omega = 2\pi f$.

Комплексное напряжение на зажимах неразветвленной цепи принимает вид

$$\dot{U} = R\dot{I} + j(X_L - X_C)\dot{I} = (R + jX)\dot{I} = \underline{Z}\dot{I},$$

где $X = X_L - X_C$ – реактивное сопротивление цепи, Ом.

Полное комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = R + jX = Ze^{j\varphi}, \quad (4.5)$$

где Z – модуль полного комплексного сопротивления, Ом,

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (4.6)$$

где φ – аргумент полного комплексного сопротивления, определяющий угол сдвига фаз между напряжением и током, рад,

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (4.7)$$

Векторные диаграммы тока и напряжений в неразветвленной цепи синусоидального тока строят на комплексной плоскости в соответствии с уравнением, записанным по второму закону Кирхгофа (4.1), и с учетом фазовых сдвигов напряжений $\dot{U}_R, \dot{U}_L, \dot{U}_C$ согласно выражениям (4.2) – (4.4). Построение векторной диаграммы рекомендуется начинать с вектора тока, а затем изображать векторы напряжений. Все векторы должны изображаться в выбранных масштабах – по току и по напряжению.

На рис. 4.2 представлены векторные диаграммы при последовательном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

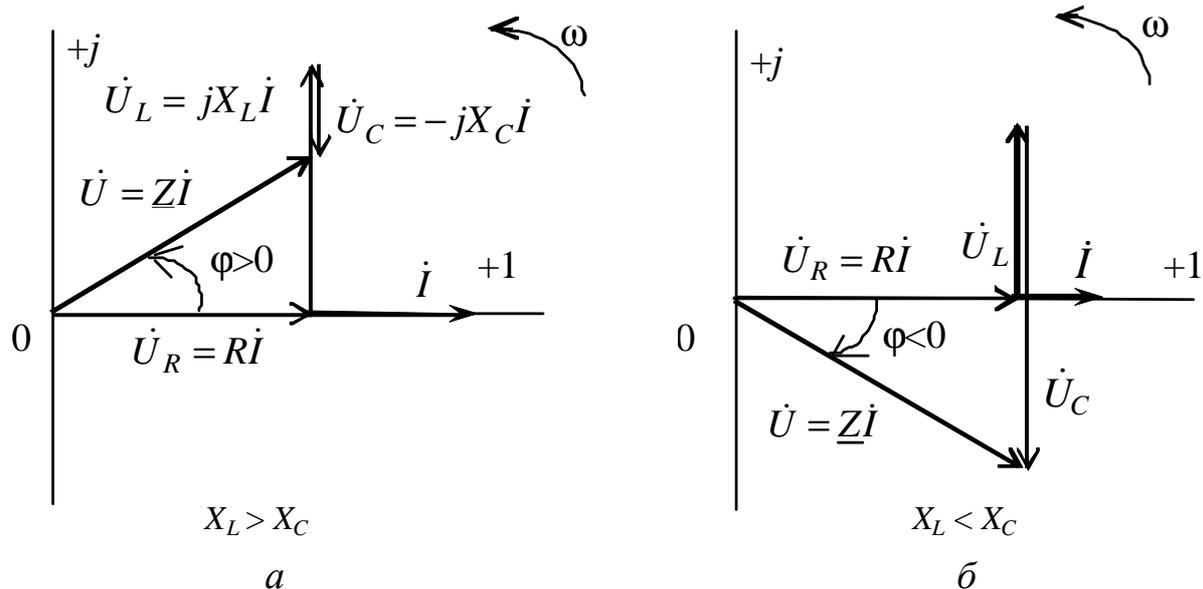


Рис. 4.2

Диаграмма (а) относится к случаю, когда реактивное сопротивление $X > 0$, т.е. в цепи преобладает индуктивная нагрузка, ток \dot{I} отстает от напряжения \dot{U} , и угол сдвига фаз положительный. Диаграмма (б) соответствует случаю, когда $X < 0$, т.е. в цепи преобладает емкостная нагрузка, ток \dot{I} опережает напряжение \dot{U} , а угол сдвига фаз φ отрицательный.

Угол сдвига фаз φ между током \dot{I} и приложенным напряжением \dot{U} всегда направлен от вектора тока к вектору напряжения (см. рис. 4.2, а и б). Если направление стрелки угла φ совпадает с направлением вращения векторов ω , то знак угла принимается положительным, если направление противоположно – отрицательным.

В цепи с последовательно соединенными R -, L -, C -элементами возможен режим, когда сдвиг фаз $\varphi = 0$ и полное реактивное сопротивление $X = 0$. Это явление называется *резонансом напряжений*.

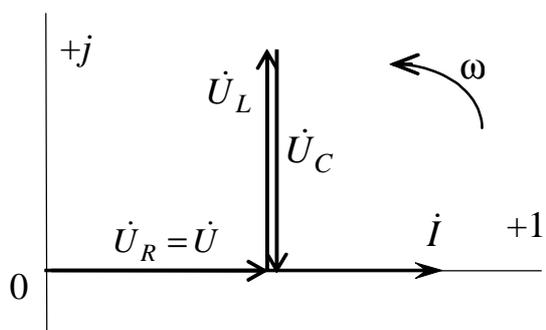


Рис. 4.3

В рассматриваемой цепи (рис. 4.1) условие резонанса напряжений выливается в равенство абсолютных значений индуктивного и емкостного сопротивлений, поскольку $X = X_L - X_C$. Векторная диаграмма тока и напряжений для этого случая показана на рис. 4.3.

При этом выполняется условие $\varphi = 0$ и $|\dot{U}_L| = |\dot{U}_C|$, причем действующие значения этих напряжений могут превышать напряжение U на зажимах цепи.

4.1.2. Резонанс напряжений

Резонансом (в электрической цепи) называется явление в электрической цепи, содержащей участки, имеющие индуктивный и емкостный характер, при котором разность фаз синусоидального электрического напряжения и синусоидального электрического тока на входе цепи равна нулю.

Резонанс на участке электрической цепи, содержащей последовательно соединенные индуктивный и емкостный элементы, называется *резонансом напряжений*.

Таким образом, главным условием резонанса является условие $\varphi = 0$.

Из равенства нулю реактивного сопротивления электрической цепи, содержащей последовательно соединенные индуктивный и емкостный элементы (рис. 4.1), $X = \omega L - 1/(\omega C) = 0$ следует, что режим резонанса напряжений возникает на частоте

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

называемой резонансной, которая определяет частоту незатухающих колебаний данной цепи и характеризует установление в ней наибольшего значения тока I_{\max} , так как при этом $Z \rightarrow \min$.

Резонансный режим достигается изменением индуктивности катушки (L), емкости конденсатора (C) или частоты приложенного напряжения ($\omega = 2\pi f$).

Значительное повышение напряжения на индуктивности $U_{L_{\text{рез}}}$ в момент резонанса по сравнению с общим напряжением U будет иметь место при неравенстве $R < X_L$, которое сведется к выполнению условия

$$R < \sqrt{\frac{L}{C}},$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – волновое сопротивление цепи, Ом.

Величина, которая указывает, во сколько раз напряжение на реактивных сопротивлениях ($U_{Lрез}$ и $U_{Cрез}$) в момент резонанса больше напряжения, приложенного к цепи, называется *добротностью контура Q*:

$$Q = \frac{U_{Lрез}}{U} = \frac{U_{Cрез}}{U}. \quad (4.8)$$

На рис. 4.4 приведены резонансные кривые зависимостей тока и напряжений в функции емкости C .

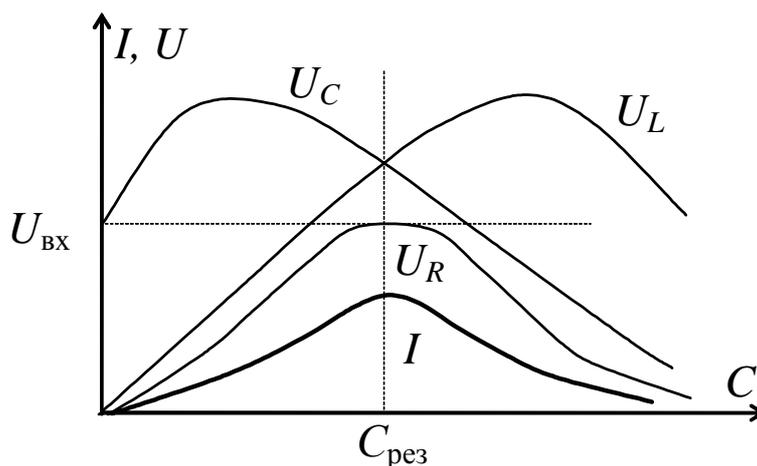


Рис. 4.4

Аналогичные кривые могут быть построены и как функции от L , и как функции от ω .

С дополнительными сведениями по данному разделу можно ознакомиться в [1 – 6, 8].

4.2. Задачи для самостоятельного решения

Вопросы расчета электрических цепей синусоидального тока при последовательном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений и различных режимах работы (пп. 4.1.1, 4.1.2) рассматриваются в следующих задачах.

Задача 1. Заданы параметры элементов электрической цепи (рис. 4.5) и приложенное напряжение $u_{вх}(t) = 141 \sin 314t$, В.

Определите напряжение на катушке \dot{U}_K и постройте векторную диаграмму тока и напряжений.

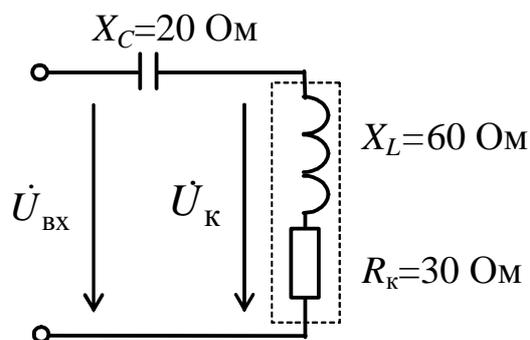


Рис. 4.5

Задача 2. Заданы параметры элементов электрической цепи (рис. 4.6) и входное напряжение $\dot{U}_{\text{вх}} = 50 \text{ В}$. Определите напряжение \dot{U}_{ab} , потребляемые активную и полную мощности. Постройте векторную диаграмму тока и напряжений.

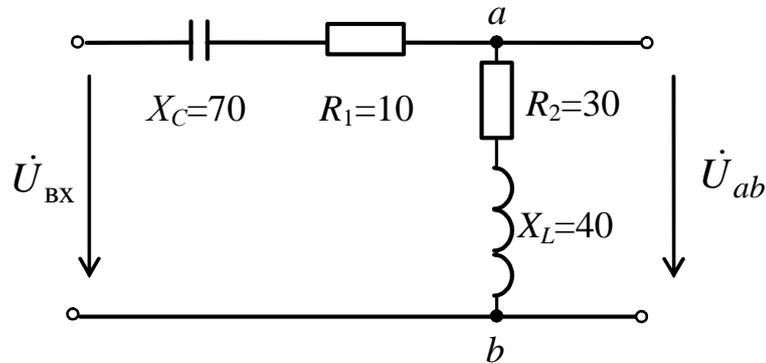


Рис. 4.6

Задача 3. Ток в цепи $i(t) = \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{9})$, А. Параметры заданы в [Ом] (рис. 4.7).

Определите, между какими точками в этой цепи будет наблюдаться наибольшее напряжение. Задачу рекомендуется решать с помощью векторной диаграммы тока и напряжений.

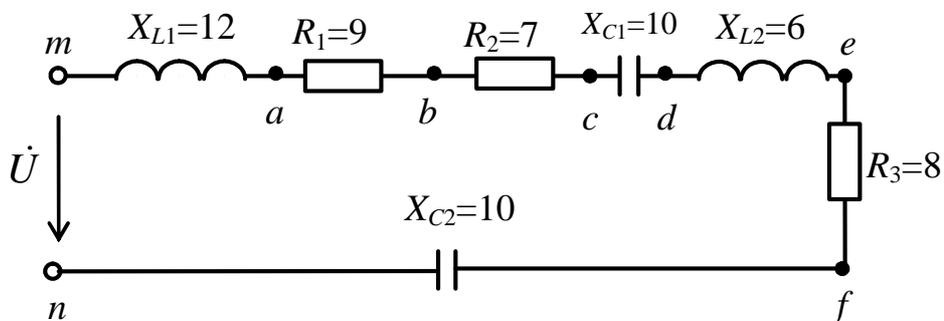


Рис. 4.7

Задача 4. В неразветвленной электрической цепи, содержащей $R = 40 \text{ Ом}$, $X_L = 7 \text{ Ом}$ и $X_C = 10 \text{ Ом}$ (рис. 4.8), ко входу приложено напряжение $U = 220 \text{ В}$ при частоте $f = 50 \text{ Гц}$.

Определите частоту f_0 , при которой возникает резонанс напряжений, ток I и полную комплексную мощность \underline{S} цепи при резонансе.

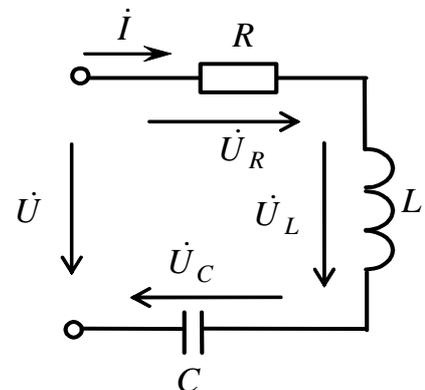


Рис. 4.8

Задача 5. Каким должно быть сопротивление X_C , чтобы при замыкании ключа $SA1$ (рис. 4.9) показание амперметра не изменилось?

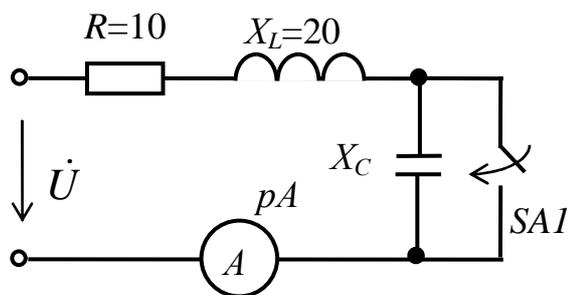


Рис. 4.9

Задача 6. Восстановите по виду векторной диаграммы тока и напряжений (рис. 4.10) электрическую цепь и определите ее параметры, если $U_1 = 30$ В, $U_2 = 40$ В, $U_3 = 20$ В, $U_4 = 50$ В, $U_5 = 40$ В.

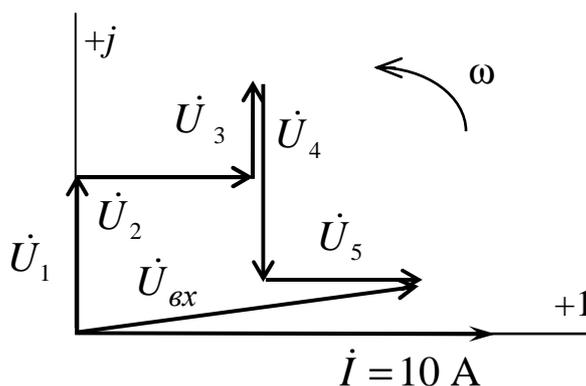


Рис. 4.10

4.3. Пример практической реализации неразветвленной электрической цепи синусоидального тока при последовательном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений

Практическая реализация электрических цепей необходима для закрепления усвоения выше изложенных теоретических положений и может быть проведена на универсальном стенде при соблюдении требований, изложенных в Приложении.

Стенд должен содержать:

- автотрансформатор (АТ) со встроенным вольтметром, обеспечивающий изменение напряжения в диапазоне $(0 \div 250)$, В и расположенный в «Блоке включения»;

- индуктивную катушку $L8$ с регулируемой индуктивностью, расположенную в «Блоке индуктивностей», при этом сердечник должен быть полностью разомкнут, для чего необходимо многооборотный регулятор индуктивности повернуть против часовой стрелки до упора;

- батарею конденсаторов от $0,5$ мкФ до 62 мкФ, расположенную в «Блоке конденсаторов»;

– резистор с сопротивлением 20 Ом, расположенный в «Блоке нагрузок», используемый в качестве резистора R_1 исследуемой цепи;
 – электронные измерительные приборы с автоматическим выбором пределов измерения и рода тока, расположенные в «Блоке измерительных приборов»:

а) pA – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А;

б) $pV1$ и $pV2$ – вольтметры с верхним пределом измерения 250 В;

в) pW – ваттметр с пределами измерений по току (0,01 ÷ 1), А и по напряжению (5 ÷ 250), В, который является универсальным прибором и измеряет одновременно величины тока, напряжения, мощности и угла сдвига фаз на участке, к которому подключен.

Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят. Установите напряжение на АТ равным нулю, для этого ручку регулятора напряжения поверните против часовой стрелки до упора.

С целью практической реализации неразветвленной электрической цепи синусоидального тока при последовательном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений предлагается к рассмотрению следующая электрическая схема.

– Соберите электрическую цепь (рис. 4.11).

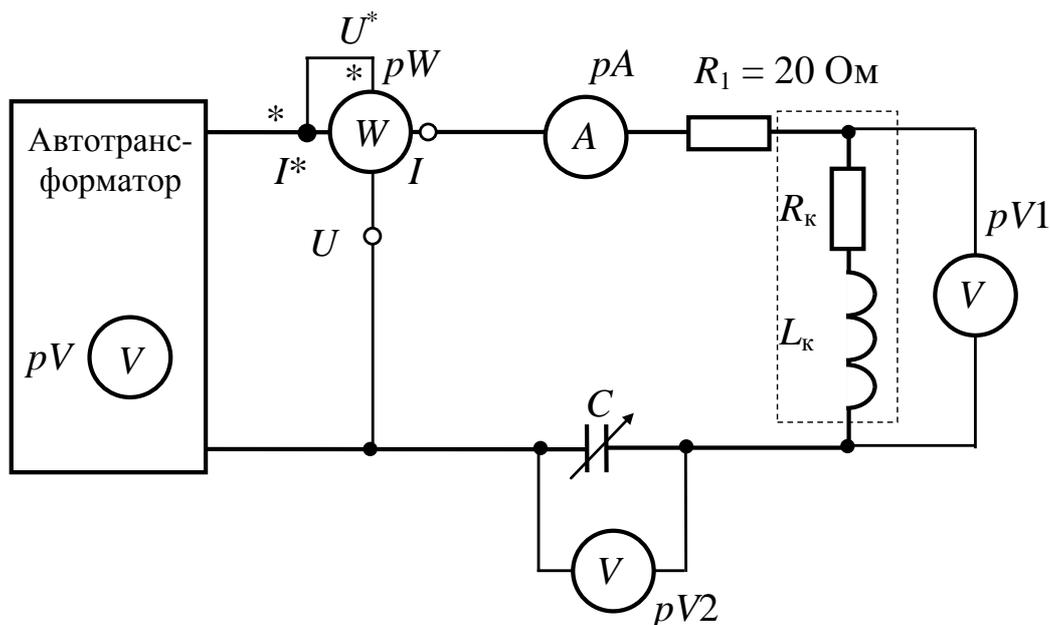


Рис. 4.11

– Установите с помощью автотрансформатора (АТ) напряжение на входе цепи $U = (15 \div 25)$, В по указанию преподавателя.

– Экспериментально определите величину резонансной емкости $C_{рез}$, руководствуясь признаками резонанса.

– Произведите измерения I , U_K , U_C , P , ϕ в цепи при различных величинах емкости конденсатора C (три значения – до значения резонансной емкости $C_{рез}$ и три – после).

Приложенное ко входу цепи напряжение $U_{вх}$ необходимо поддерживать неизменным.

Результаты занесите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

№	Измерено							Вычислено						
	C , мкФ	$U_{вх}$ В	P Вт	I А	U_K В	U_C В	ϕ град	X_C Ом	X_L Ом	L Гн	R Ом	Z Ом	S ВА	Q вар
1														
·														
·														
7														

– Рассчитайте параметры реальной индуктивной катушки из условия резонанса напряжений, полное сопротивление цепи во всех исследуемых режимах, а также потребляемые мощности.

При расчете основных параметров цепи следует воспользоваться методом трех приборов – показаниями амперметра pA (I), вольтметра pV ($U_{вх}$) и ваттметра pW (P).

$$\text{Емкостное сопротивление } X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}, \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление $X_L = \omega L = 2\pi fL$, Ом; но так как в нашем случае индуктивность неизвестна, X_L определяется из условия резонанса $\phi = 0$, $X = X_L - X_C = 0$, $X_L = X_{Cрез}$.

Сопротивление $R = R_1 + R_K$ состоит из сопротивления резистора R_1 и собственного сопротивления реальной катушки R_K и определяется из выражения

$$R = \frac{P}{I^2} \text{ или } R = Z_{рез}.$$

Полное сопротивление Z определяется согласно закону Ома по показаниям вольтметра и амперметра:

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

модуль полной комплексной мощности S :

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

где P – активная мощность цепи, Вт,

$Q = Q_L - Q_C = X_L I^2 - X_C I^2 = (X_L - X_C) I^2$ – реактивная мощность, вар.

– Постройте в масштабе графики зависимостей $I = f(C)$, $P = f(C)$, $Z = f(C)$, $\varphi = f(C)$.

– Постройте в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений и треугольники сопротивлений для трех случаев:

$$C < C_{\text{рез}}; C = C_{\text{рез}}; C > C_{\text{рез}}.$$

При построении векторных диаграмм токов и напряжений необходимо выполнить расчет напряжений на отдельных элементах в соответствии с выражениями (4.2), (4.3), (4.4).

Векторные диаграммы для различных сочетаний индуктивного и емкостного сопротивлений приведены на рис. 4.2 и 4.3.

Векторные диаграммы должны быть изображены с учетом выбранных масштаба тока и масштаба напряжения.

– Измените емкость конденсатора, установив $C < C_{\text{рез}}$ по указанию преподавателя. Изменяя индуктивность катушки (многооборотный регулятор индуктивности повернуть по часовой стрелке), добейтесь резонанса напряжений. Сделайте три замера, изменяя величину индуктивности.

Запишите полученные значения в таблицу, аналогичную табл. 4.1.

– Рассчитайте параметры реальной индуктивной катушки из условия резонанса напряжений, полное сопротивление цепи во всех исследуемых режимах.

Контрольные вопросы

1. Объясните явление резонанса на примере цепи с последовательным соединением R -, L - и C -элементов. Постройте векторную диаграмму тока и напряжений.

2. При каком соотношении индуктивного и емкостного сопротивлений угол сдвига фаз между током и напряжением отрицательный?

3. Какой знак будет иметь угол сдвига фаз между током и напряжением, если в цепи преобладает индуктивное сопротивление?

4. По каким признакам можно судить о наступлении резонанса напряжений в цепи на практике?

5. Какой физический смысл имеет добротность контура?

6. Как зависят активная мощность P , реактивная мощность Q и полная мощность S от параметров резонансного контура?

7. Определите величину емкости в цепи, содержащей последовательно соединенные катушку индуктивности и конденсатор, в которой наблюдается резонанс напряжений.

Параметры катушки индуктивности: $R = 10$ Ом, $L = 0,8$ Гн. Частота питающей сети $f = 50$ Гц.

8. Определите величину напряжения на конденсаторе, если в цепи с последовательно соединенными катушкой индуктивности и конденсатором имеет место резонанс напряжений.

Параметры катушки индуктивности: $R = 5$ Ом, $L = 1,1$ Гн; цепь подключена к источнику питания с напряжением $u = 51\sin(314t)$, В.

9. Определите добротность резонансного контура, содержащего последовательно включенные катушку индуктивности с активным сопротивлением $R = 6$ Ом и конденсатор емкостью $C = 5$ мкФ. Частота питающей сети $f = 400$ Гц.

ГЛАВА 5

РАЗВЕТВЛЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Данная глава посвящена изучению режимов работы однофазной электрической цепи синусоидального тока с параллельным соединением ветвей и способам повышения коэффициента мощности цепи.

В результате изучения данного раздела студенты должны:

– знать основы расчета электрических цепей синусоидального тока, основные фазовые соотношения для разветвленных цепей, а также основные признаки и условия возникновения резонанса токов;

– уметь выполнять простейшие расчеты электрических цепей синусоидального тока с параллельным соединением элементов, подбирать емкость конденсатора для компенсации индуктивной мощности;

– иметь навыки сборки электрических цепей, выбора средств и методов электрических измерений в разветвленных цепях и обработки результатов эксперимента.

5.1. Режимы работы разветвленных электрических цепей синусоидального тока

5.1.1. Параллельное соединение индуктивной катушки и конденсатора

На рис. 5.1 представлена электрическая цепь, состоящая из двух ветвей, которая относится к разветвленным электрическим цепям и в общем случае содержит элементы R_1 , L и R_2 , C .

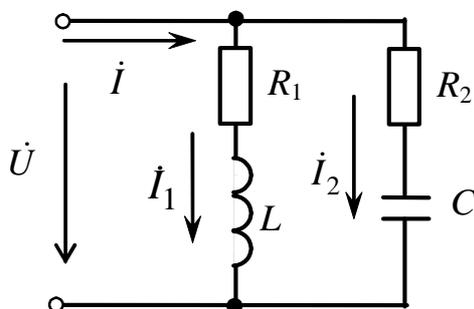


Рис. 5.1

Для этой цепи справедлив первый закон Кирхгофа, записанный в комплексной форме:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2,$$

ток в первой ветви

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1} = \frac{\dot{U}}{R_1 + jX_L} = \frac{R_1 - jX_L}{R_1^2 + X_L^2} \cdot \dot{U} = \\ &= \left(\frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2} - j \frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2} \right) \cdot \dot{U} = (G_1 - jB_L) \cdot \dot{U}; \end{aligned}$$

ток во второй ветви

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2} = \frac{\dot{U}}{R_2 - jX_C} = \frac{R_2 + jX_C}{R_2^2 + X_C^2} \cdot \dot{U} = \\ &= \left(\frac{R_2}{R_2^2 + X_C^2} + j \frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2} \right) \cdot \dot{U} = (G_2 + jB_C) \cdot \dot{U}, \end{aligned}$$

где G_1 и G_2 – активные проводимости первой и второй ветвей, См;

B_L – индуктивная проводимость первой ветви, См;

B_C – емкостная проводимость второй ветви, См.

Тогда выражение для тока в неразветвленной части цепи можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = (G_1 - jB_L) \cdot \dot{U} + (G_2 + jB_C) \cdot \dot{U} = \\ &= ((G_1 + G_2) - j(B_L - B_C)) \cdot \dot{U} = \underline{Y} \cdot \dot{U}. \end{aligned}$$

Вычисление проводимостей можно проводить по выражениям:

$$G_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}; \quad G_2 = \frac{R_2}{Z_2^2}; \quad (5.1)$$

$$B_L = \frac{X_L}{Z_1^2}; \quad B_C = \frac{X_C}{Z_2^2}; \quad (5.2)$$

где

$$Z_1^2 = R_1^2 + X_L^2,$$

$$Z_2^2 = R_2^2 + X_C^2.$$

Комплекс полной проводимости цепи имеет вид

$$\underline{Y} = (G_1 + G_2) - j(B_L - B_C) = Y e^{-j\varphi}, \quad (5.3)$$

где $Y = \sqrt{(G_1 + G_2)^2 + (B_L - B_C)^2}$ – модуль полной комплексной проводимости, См;

$\varphi = \arctg \frac{B_L - B_C}{G_1 + G_2}$ – сдвиг фаз между напряжением \dot{U} и током \dot{I} .

Исследование режимов работы разветвленной цепи можно проводить графически с помощью векторной диаграммы токов

и напряжения. Для схемы на рис. 5.1 векторная диаграмма токов и напряжения в случае $B_L < B_C$ имеет вид (рис. 5.2).

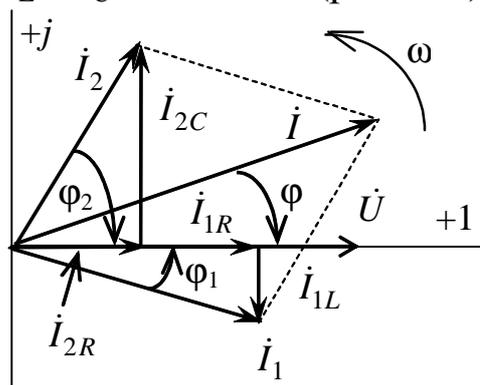


Рис. 5.2

При этом

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_L^2}},$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_L}{R_1} > 0$$

– ветвь активно-индуктивная, направление отсчета угла совпадает с направлением вращения векторов ω , ток отстает от напряжения;

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + X_C^2}},$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{-X_C}{R_2} < 0$$

– ветвь активно-емкостная, направление стрелки угла противоположно направлению вращения векторов, ток опережает напряжение.

Токи в ветвях можно разложить на составляющие (рис. 5.2)

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1R} + \dot{I}_{1L};$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{2R} + \dot{I}_{2C}.$$

Суммарный ток

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_{1R} + \dot{I}_{1L} + \dot{I}_{2R} + \dot{I}_{2C} = (\dot{I}_{1R} + \dot{I}_{2R}) + (\dot{I}_{1L} + \dot{I}_{2C}),$$

где $\dot{I}_{1R} = G_1 \dot{U}$; $\dot{I}_{2R} = G_2 \dot{U}$ – активные составляющие токов, А;

$\dot{I}_{1L} = -jB_L \dot{U}$ – индуктивная составляющая тока \dot{I}_1 , А;

$\dot{I}_{2C} = jB_C \dot{U}$ – емкостная составляющая тока \dot{I}_2 , А.

5.1.2. Резонанс токов

Резонансом (в электрической цепи) называется явление в электрической цепи, содержащей участки, имеющие индуктивный и емкостный характер, при котором разность фаз синусоидального электрического напряжения и синусоидального электрического тока на входе цепи равна нулю.

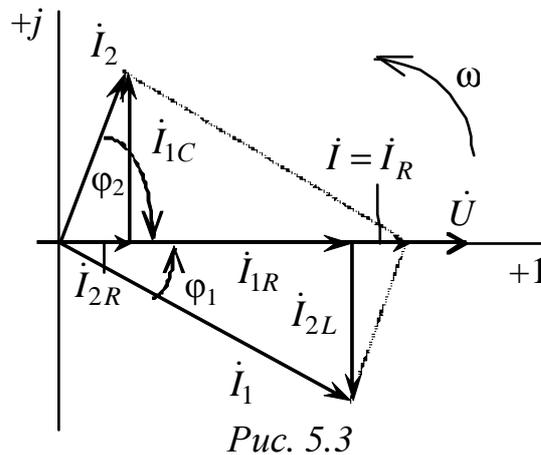
Резонанс на участке электрической цепи при параллельном соединении индуктивного и емкостного элементов называется *резонансом токов*.

Из определения резонанса следует, что угол сдвига фаз равен нулю ($\varphi = 0$), т.е. ток совпадает с напряжением. Это возможно при условии $B = B_L - B_C = 0$ (см. рис. 5.1). Полная проводимость цепи при этом

$$Y = \sqrt{(G_1 + G_2)^2 + (B_L - B_C)^2} = G_1 + G_2 = G$$

оказывается минимальной, равной активной проводимости цепи. Ток в неразветвленной части цепи $I = GU$ тоже минимальный, что позволяет обнаруживать резонанс токов по показаниям амперметра.

Векторная диаграмма токов и напряжения при резонансе токов строится так же, как и для любой параллельной схемы, но с учетом особенностей режима ($\varphi = 0, I_{1L} = I_{2C}, \dot{I} = \dot{I}_R = \dot{I}_{1R} + \dot{I}_{2R}$) (рис. 5.3).



Если $X_L \gg R_1$ и $X_C \gg R_2$, то $I_{1L} \gg I_{1R}$, $I_{2C} \gg I_{2R}$ и $I_1 \gg I$, $I_2 \gg I$, т.е. токи в ветвях значительно больше, чем ток в неразветвленной части цепи. Это свойство – усиление тока – является важнейшей особенностью резонанса токов и широко используется на практике. Оно характеризуется *добротностью контура*

$$Q = \frac{I_L}{I} = \frac{I_C}{I}. \quad (5.4)$$

Из условия $B = B_L - B_C = 0$ можно определить резонансную частоту

$$\frac{2\pi f_0 L}{R_1^2 + (2\pi f_0 L)^2} - \frac{1/2\pi f_0 C}{R_2^2 + (1/2\pi f_0 C)^2} = 0,$$

а также сделать вывод, что резонанс токов может быть достигнут не только изменением параметров L , C и f , но и R_1 и R_2 .

5.1.3. Повышение коэффициента мощности цепи

Коэффициентом мощности электрической цепи называется скалярная величина, равная отношению активной мощности P к полной мощности S , потребляемой цепью, т.е.

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}.$$

Коэффициент мощности показывает, какая часть электрической энергии необратимо преобразуется в другие виды энергии и, в частности, используется для выполнения полезной работы; полностью только активная составляющая тока определяет преобразование электрической энергии в другие виды энергии. Реактивные (индуктивная, емкостная) мощности, обусловленные соответственно энергией магнитного поля индуктивности и электрического поля емкости, не совершают никакой полезной работы, однако они увеличивают потребляемый цепью ток, а соответственно, и потери мощностей в подводящих проводах.

Машины переменного тока, трансформаторы и большинство других электротехнических устройств представляют собой активно-индуктивную нагрузку. Чем больше индуктивная составляющая сопротивления цепи, тем меньше $\cos\varphi$ и больше ток:

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

Все элементы цепи, в том числе передающие линии и соединительные провода, рассчитаны на определенную величину тока. Для использования их пропускной способности с целью передачи наибольшей активной мощности необходимо повысить

$\cos\varphi$, иначе потребуется увеличение сечения проводов и другие дополнительные капитальные затраты.

Повышение $\cos\varphi$ в электроэнергетических системах является важной технико-экономической проблемой. До недавнего времени для повышения коэффициента мощности электроустановок предприятий нормировался минимально допустимый $\cos\varphi$, а в настоящее время устанавливается допустимое значение реактивной мощности Q и нормируется $\operatorname{tg}\varphi = Q/P$, определяемый по показаниям счетчиков реактивной и активной энергии.

Основные пути повышения $\cos\varphi$:

а) правильный подбор номинальной мощности асинхронных двигателей для привода рабочих машин и улучшение режимов работы оборудования: стараются избегать работы оборудования на холостом ходу или с недогрузом, что резко снижает $\cos\varphi$;

б) искусственная компенсация реактивной мощности потребителей с помощью статических конденсаторов и синхронных компенсаторов, в результате чего повышение $\cos\varphi$ происходит вследствие взаимной компенсации потоков реактивной энергии.

Величину емкости, необходимую для повышения коэффициента мощности цепи (рис. 5.4) до заданного значения $\cos\varphi$, можно определить, воспользовавшись векторной диаграммой токов и напряжения (рис. 5.5).

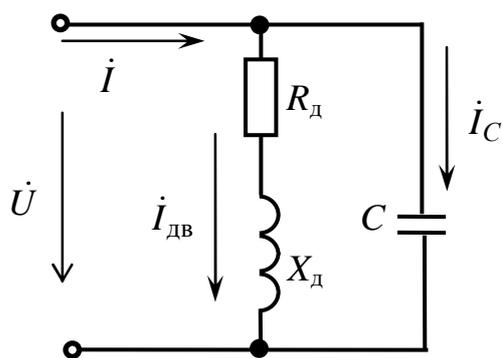


Рис. 5.4

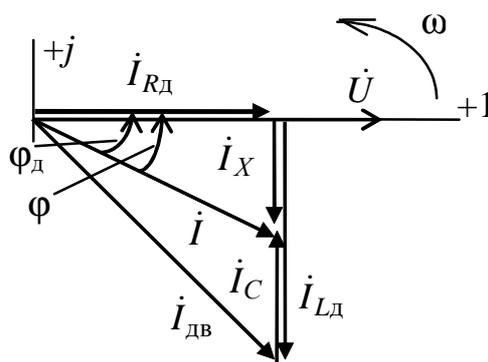


Рис. 5.5

Из диаграммы видно, что для получения угла сдвига фаз требуемой величины φ , емкостная ветвь должна иметь ток, равный разности реактивных составляющих токов потребителя до

компенсации угла сдвига фаз $I_{Lд}$ и после компенсации угла сдвига фаз I_X . Поскольку эти токи расположены на одной прямой и направлены противоположно, то компенсирующий ток будет равен разности

$$I_C = I_{Lд} - I_X.$$

Эти токи можно определить через активную составляющую тока

$$I_{Lд} = I_{Rд} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{д} \quad \text{и} \quad I_X = I_{Rд} \cdot \operatorname{tg}\varphi.$$

Ток $I_C = I_{Rд} (\operatorname{tg}\varphi_{д} - \operatorname{tg}\varphi)$.

Токи могут быть выражены через напряжение, емкость и мощность:

$$I_C = \omega C \cdot U; \quad \text{а} \quad I_{Rд} = \frac{P}{U}, \quad \text{тогда} \quad \omega C \cdot U = \frac{P}{U} (\operatorname{tg}\varphi_{д} - \operatorname{tg}\varphi).$$

Отсюда определяется искомое значение компенсирующей емкости конденсатора

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg}\varphi_{д} - \operatorname{tg}\varphi). \quad (5.5)$$

Допустимая минимальная величина коэффициента мощности потребителей определена ГОСТом: $\cos\varphi > 0,8$.

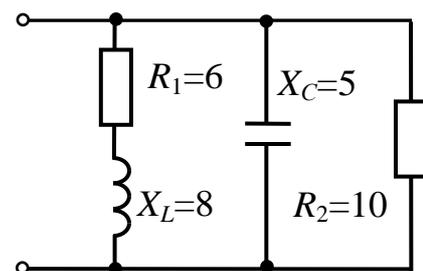
Обычно при помощи батареи конденсаторов компенсацию угла сдвига фаз осуществляют, повышая $\cos\varphi$ до $0,9 \div 0,95$.

С дополнительными сведениями по данному разделу можно ознакомиться в [1, 2, 4 – 6, 8].

5.2. Задачи для самостоятельного решения

Вопросы расчета разветвленных электрических цепей синусоидального тока (пп. 5.1.1 – 5.1.3) рассматриваются в следующих задачах.

Задача 1. Определите полную комплексную проводимость цепи (рис. 5.6), параметры элементов указаны на схеме в [Ом].



Задача 2. Определите показания амперметров (рис. 5.7), если $U = 220$ В, параметры элементов указаны на схеме в [Ом]. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений.

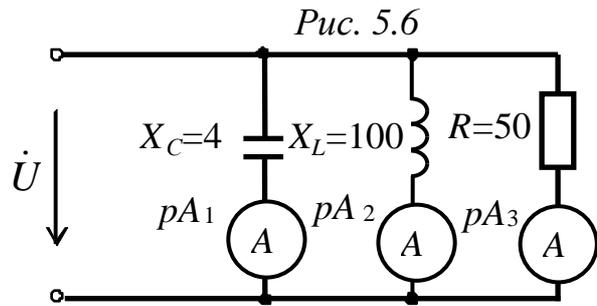


Рис. 5.7

Задача 3. Определите потребляемый ток i и напряжение \dot{U}_{ab} , если известны параметры элементов цепи (рис. 5.8) в [Ом] и входное напряжение $U_{вх} = 12$ В. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений.

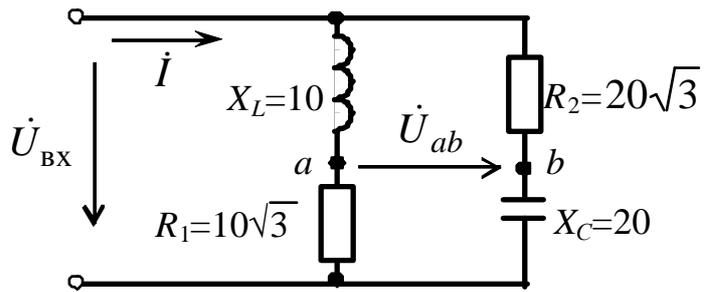


Рис. 5.8

Задача 4. Активно-индуктивная нагрузка с параметрами $R_1 = 30$ Ом и $X_1 = 40$ Ом включена в сеть с синусоидальным напряжением 220 В (рис. 5.9).

Какой величины нужно подключить емкость C , чтобы коэффициент мощности цепи стал равен 0,9?

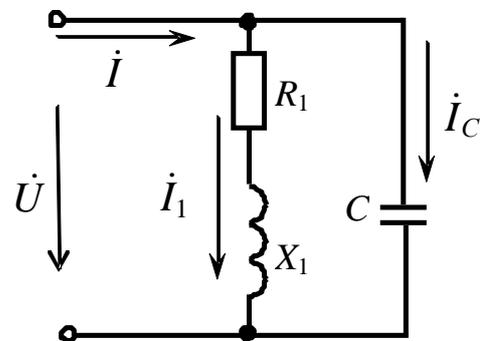


Рис. 5.9

Задача 5. К асинхронному двигателю, полезная мощность которого $P = 3,7$ кВт, КПД $\eta = 83,5$ %, сопротивления проводов $R_{пр} = 2$ Ом, подводится синусоидальное напряжение величиной $U = 380$ В. Двигатель работает с $\cos\phi_{дв} = 0,707$. Конденсаторы какой емкости нужно включить параллельно фазам статорной обмотки двигателя, чтобы повысить $\cos\phi$ до 0,9? Как изменяются при этом потери мощности в линиях?

Задача 6. Определите значение емкостной составляющей тока \dot{I} , если известны параметры элементов цепи в [Ом] и $U = 100$ В (рис. 5.10).

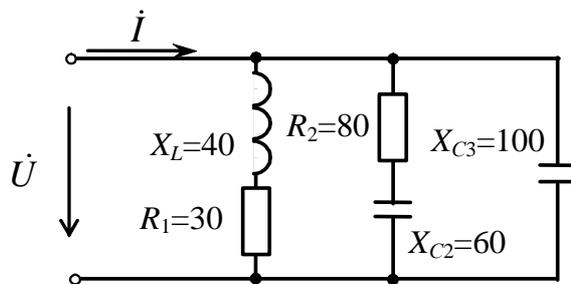


Рис. 5.10

Задача 7. По векторной диаграмме токов и напряжения (рис. 5.11) восстановите электрическую схему и параметры ее элементов, если известно, что $U = 50$ В, $I_1 = 5$ А, $I_2 = 10$ А, $I_3 = 2,5$ А.

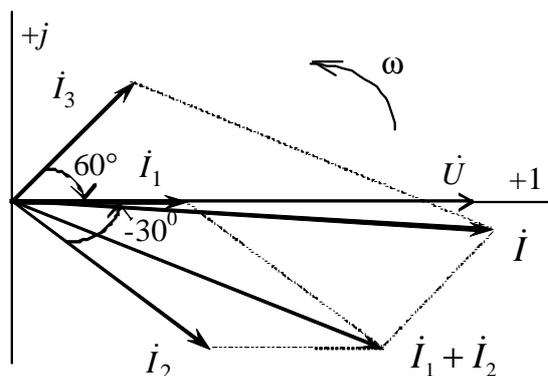


Рис. 5.11

5.3. Пример практической реализации разветвленной электрической цепи синусоидального тока

Практическая реализация электрических цепей необходима для закрепления усвоения выше изложенных теоретических положений и может быть проведена на универсальном стенде при соблюдении требований, изложенных в Приложении.

Стенд должен содержать:

- автотрансформатор (АТ) со встроенным вольтметром, обеспечивающий изменение напряжения в диапазоне $(0 \div 250)$, В и расположенный в «Блоке включения»;

- индуктивную катушку с регулируемой индуктивностью $L8$, расположенную в «Блоке индуктивностей»; при этом сердечник должен быть полностью разомкнут, для чего необходимо многооборотный регулятор индуктивности повернуть против часовой стрелки до упора;

- батарею конденсаторов от $0,5$ мкФ до 62 мкФ, расположенную в «Блоке конденсаторов»;

– резистор с переменным сопротивлением 220 Ом, расположенный в «Блоке нагрузок», используемый в качестве резистора R_1 ;

– электронные измерительные приборы с автоматическим выбором пределов измерения и рода тока, расположенные в «Блоке измерительных приборов»:

а) $pA1$, $pA2$ – амперметры с верхним пределом измерения 2,5 А;

б) pV – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В;

в) pW – ваттметр с пределами измерений по току (0,01 ÷ 1), А и по напряжению (5 ÷ 250), В, который является универсальным прибором и измеряет одновременно величины тока, напряжения, мощности и угла сдвига фаз на участке, к которому подключен.

Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят. Установите напряжение на АТ равным нулю, для этого ручку регулятора напряжения поверните против часовой стрелки до упора.

С целью практической реализации разветвленной электрической цепи синусоидального тока предлагается к рассмотрению следующая электрическая схема.

– Соберите электрическую цепь (рис. 5.12).

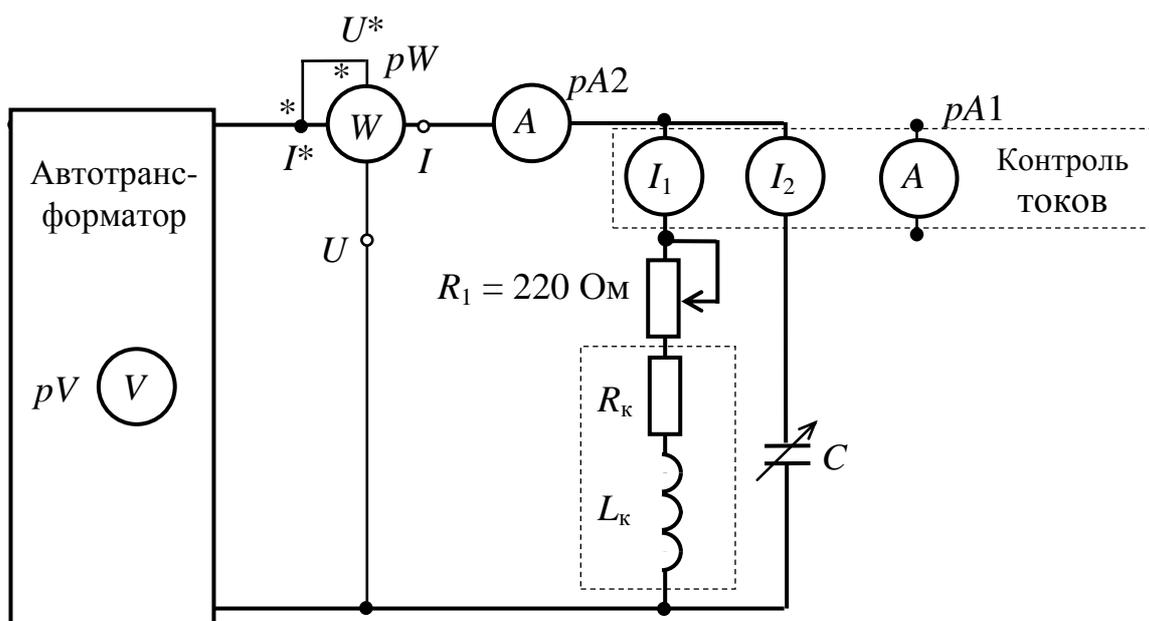


Рис. 5.12

– Установите с помощью автотрансформатора напряжение на входе цепи $U = (20 \div 40)$, В по указанию преподавателя.

– Установите с помощью регулятора резистора 220 Ом величину тока в первой ветви $(0,3 \div 0,4)$, А (по указанию преподавателя).

– Исследуйте электрическую цепь с параллельным соединением ветвей – одна ветвь активно-индуктивная (R_1, R_k, L_k), другая – емкостная (C):

а) экспериментально определите резонансную емкость $C_{рез}$, используя основные признаки резонанса (см. пп. 5.1.2);

б) произведите измерения I, I_k, I_C, P, ϕ в цепи при различных величинах емкости конденсатора C (три-четыре значения до резонансной емкости, $C_{рез}$ и три-четыре – после резонансной) (всего 7–9 измерений). Входное напряжение $U_{вх}$ необходимо поддерживать постоянным по величине.

Результаты эксперимента занесите в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Измерено								Вычислено							
№	C мкФ	$U_{вх}$ В	I А	I_k А	I_C А	P Вт	ϕ град	Y См	B_C См	B_L См	G См	Z_1 Ом	R_1 Ом	X_L Ом	
1															
•															
•															
7															

При расчете параметров цепи следует воспользоваться методом трех приборов – показаниями амперметра pA (I), вольтметра pV ($U_{вх}$) и ваттметра pW (P).

Сопротивление первой ветви $R = R_1 + R_k$ состоит из сопротивления R_1 , которое устанавливается с помощью регулятора резистора 220 Ом и собственного сопротивления реальной катушки $R_k = 8$ Ом и определяется из выражения

$$R = \frac{P}{I_k^2}.$$

Проводимости Y, B_C, B_L, G можно определить по формулам (5.1) – (5.3).

Сопротивления ветвей Z_1 и Z_2 , необходимые для этих вычислений, можно определить по закону Ома:

$$Z_1 = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{к}}};$$
$$Z_2 = X_C = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_C};$$

в) рассчитайте параметры реальной индуктивной катушки;

г) определите добротность контура;

д) постройте в масштабе графики зависимостей $I = f(C)$; $I_{\text{к}} = f(C)$; $I_C = f(C)$; $Y = f(C)$; $\varphi = f(C)$;

е) постройте в масштабе векторные диаграммы токов и напряжения для трех случаев: $C < C_{\text{рез}}$; $C = C_{\text{рез}}$; $C > C_{\text{рез}}$.

– Решите проблему повышения коэффициента мощности реальной индуктивной катушки:

а) установите произвольное положение сердечника катушки L_8 , конденсатор отключите, произведите измерения тока, напряжения и мощности, с помощью которых определите параметры катушки $R_{\text{к}}$ и $L_{\text{к}}$;

б) рассчитайте компенсирующую емкость C , которую необходимо включить параллельно катушке, чтобы коэффициент мощности цепи ($\cos\varphi$) составил 0,98. При определении компенсирующей емкости для повышения $\cos\varphi$ цепи до фиксированного значения угла можно воспользоваться формулой (5.5) и рекомендациями пп. 5.1.3;

в) подключите предварительно рассчитанную компенсирующую емкость C и сравните экспериментально полученный угол сдвига фаз с расчетным.

Контрольные вопросы

1. Объясните явление резонанса на примере цепи с параллельным соединением R -, L - и C -элементов. Постройте векторную диаграмму токов и напряжения.

2. Как определяются активная, индуктивная и емкостная проводимости исследуемой цепи?

3. Что называется активной и реактивной составляющими тока?

4. С помощью каких приборов и по каким признакам можно судить о возникновении резонанса токов в цепи?

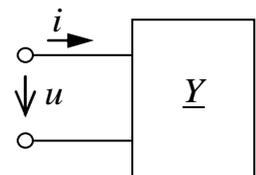
5. Какое соотношение определяет сдвиг по фазе между током и напряжением в цепи при параллельном соединении RL - и RC -ветвей?

6. Почему принципы резонанса токов используются для компенсации коэффициента мощности ($\cos\varphi$) промышленных установок?

7. Начертите треугольники сопротивлений и проводимостей и выведите формулы перехода от сопротивлений к проводимостям и обратно.

8. Напишите условие возникновения в цепи резонанса токов, выраженное через сопротивления параллельных ветвей.

9. Определите действующее значение тока на входе цепи при комплексной проводимости $\underline{Y} = 0,05e^{-j\pi/4}$, См пассивного двухполюсника и напряжении $u(t) = 141\sin(314t + \pi/4)$, В.



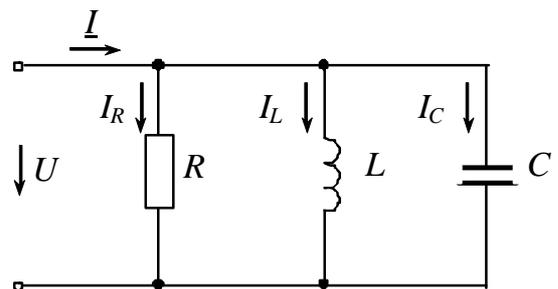
10. Определите величину индуктивности катушки L , включенной параллельно конденсатору емкостью $C = 45$ мкФ, если активное сопротивление катушки $R = 7$ Ом, а частота питающей сети $f = 50$ Гц (в цепи – резонанс).

11. Постройте векторные диаграммы токов и напряжения для трех случаев:

а) $Y_L > Y_C$;

б) $Y_L = Y_C$;

в) $Y_L < Y_C$.



ГЛАВА 6

ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ЗВЕЗДОЙ

Данная глава посвящена рассмотрению различных режимов работы трехфазной электрической цепи при соединении приемников звездой и особенностям построения векторных диаграмм напряжений и токов.

В результате изучения данного раздела студенты должны:

- знать методы расчета трехфазных цепей, особенности работы трехфазных цепей при соединении нагрузки звездой с нейтральным проводом и без него;
- уметь выполнять расчеты и строить векторные диаграммы напряжений и токов для трехфазных цепей при соединении приемников звездой;
- иметь навыки работы с электротехническими устройствами, включаемыми в трехфазные цепи.

6.1. Анализ работы трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки звездой

Под *симметричной трехфазной системой* понимается совокупность электрических цепей, в которых действуют одинаковые по амплитуде синусоидальные ЭДС (напряжения) одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе на угол (120°) и создаваемые общим источником электрической энергии.

Передача электрической энергии от источника к приемнику в трехфазной системе осуществляется с помощью линейных проводов. Для передачи электрической энергии от электрических станций (источников) и распределения ее между потребителями (приемниками) используются электрические сети.

Соединение, при котором концы всех трех фаз потребителя объединяются в общую точку, называемую *нейтралью*, а начала фаз присоединяются к трехфазному источнику питания или к трехфазной сети посредством линейных проводов, называется соединением нагрузки звездой.

На практике применяются два способа соединения звездой трехфазных потребителей:

1 – звезда с нейтральным (нулевым рабочим) проводом (рис. 6.1) – четырехпроводная цепь;

2 – звезда без нейтрального (нулевого рабочего) провода (рис. 6.2) – трехпроводная цепь.

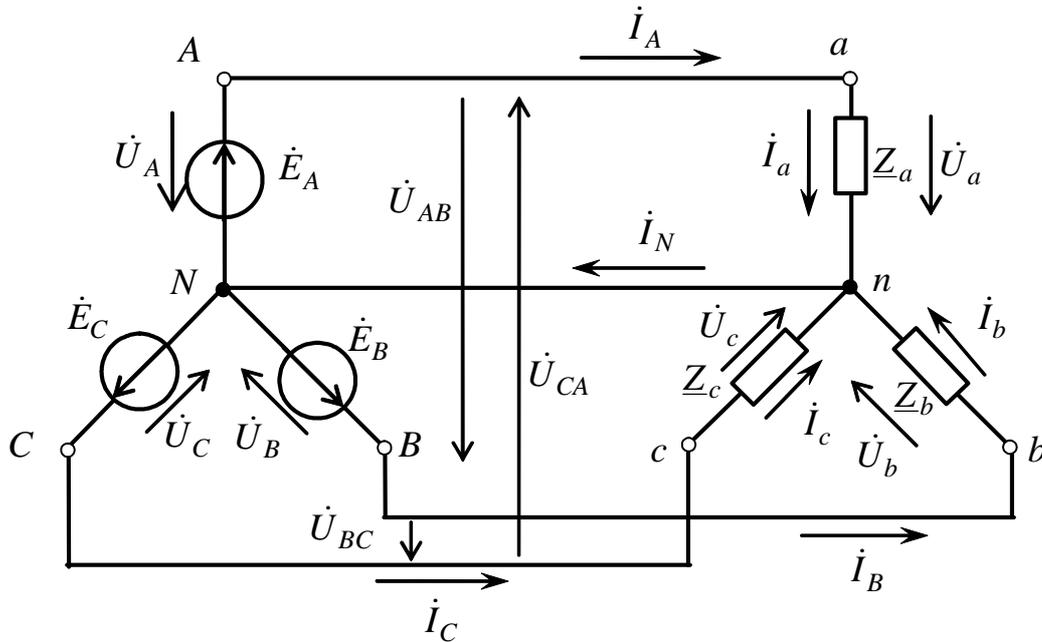


Рис. 6.1

В четырехпроводной системе имеется четвертый, нейтральный ($N - n$) – провод, соединяющий нейтральные (общие) точки фаз источника и потребителя.

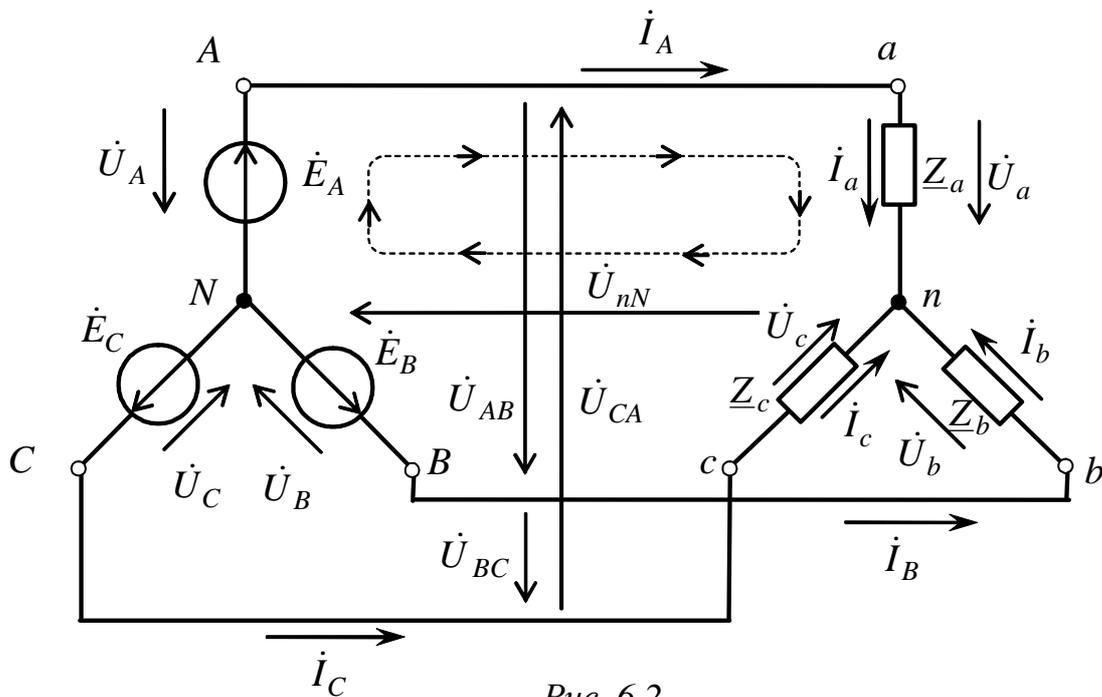


Рис. 6.2

На схемах соединения трехфазных цепей начала и концы фаз источника принято обозначать большими буквами (A, B, C, N), а начала и концы фаз приемника – малыми (a, b, c, n).

Токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ в соответствующих линейных проводах называются линейными; токи, протекающие по фазам – фазными, а ток \dot{I}_N в нулевом рабочем проводнике называется нейтральным.

Напряжения между линейными проводами потребителя $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ называются линейными; между началом и концом фаз источника $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, а также между началом и концом фаз приемника $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ – фазными.

Номинальным напряжением электрической сети является линейное напряжение.

При соединении потребителя звездой фазные токи I_ϕ равны соответствующим линейным:

$$I_\phi = I_\text{л}. \quad (6.1)$$

Между линейными и фазными напряжениями источника существуют следующие соотношения (согласно второму закону Кирхгофа):

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B;$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C;$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Аналогично записываются соотношения для линейных и фазных напряжений приемника:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b;$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c;$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a.$$

Линейные напряжения источника и приемника принимают равными, если сопротивлениями линейных проводов можно пренебречь, т.е.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca}.$$

Между фазными U_ϕ и линейными $U_\text{л}$ напряжениями источника существует соотношение

$$U_\text{л} = \sqrt{3}U_\phi. \quad (6.2)$$

На рис. 6.3 представлена схема подключения различного вида нагрузок (симметричной трехфазной и набора однофазных нагрузок) к трехфазной сети. Однофазные нагрузки включаются на фазные напряжения – между линейным проводом (L_i) и нейтральным рабочим проводом N , по которому протекает ток при несимметричной нагрузке. При необходимости включения однофазных приемников возможно и между линейными проводами. Сеть имеет нулевой защитный провод (PE) для обеспечения безопасной работы оборудования.

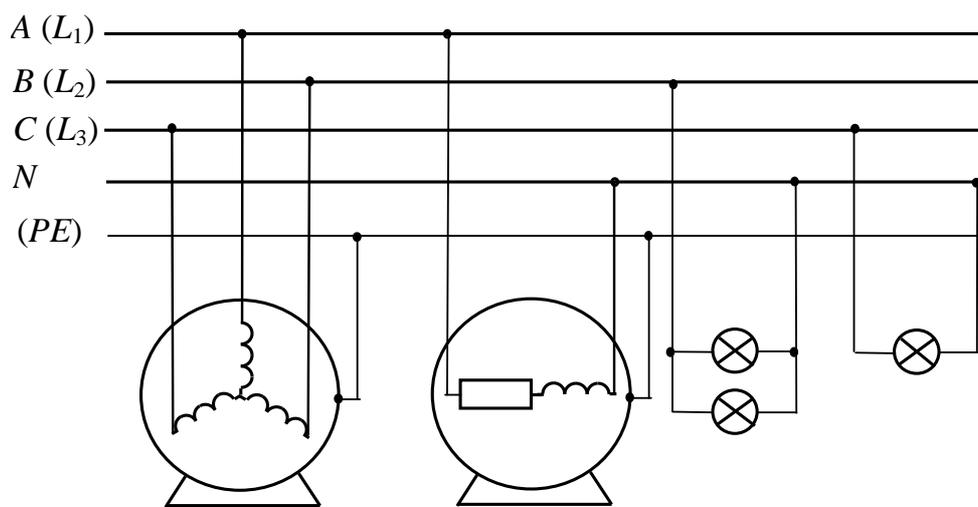


Рис. 6.3

Фазные токи потребителя определяются по закону Ома:

$$\dot{i}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; \quad \dot{i}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; \quad \dot{i}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c}.$$

Нагрузка, при которой комплексные сопротивления всех фаз потребителя равны между собой ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$), называется *симметричной*. При симметричной нагрузке для цепи без нулевого рабочего проводника и для цепи с нулевым рабочим проводником модули токов в фазах будут равны: $|\dot{I}_a| = |\dot{I}_b| = |\dot{I}_c|$, причем во втором случае ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0.$$

Например для цепи с симметричной активно-индуктивной нагрузкой (рис. 6.4, а):

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi}; \quad \text{tg}\varphi_a = \text{tg}\varphi_b = \text{tg}\varphi_c = \frac{X_\phi}{R_\phi} = \frac{X_L}{R_\phi}.$$

Векторная диаграмма напряжений и токов для этой цепи имеет вид (рис. 6.4, б).

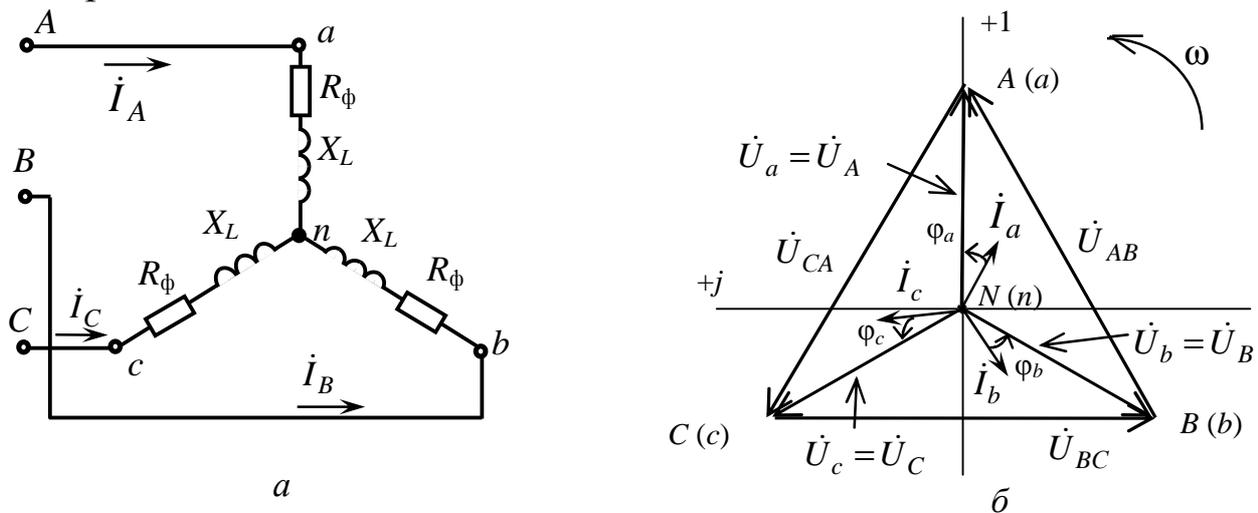


Рис. 6.4

Из векторной диаграммы видно, что при симметричной нагрузке в трехфазной цепи без нейтрального провода фазные напряжения на источнике и приемнике будут равны, токи и углы сдвига фаз будут также одинаковы. Аналогичные соотношения будут наблюдаться и при наличии нейтрального провода, но ток в нейтральном проводе будет отсутствовать.

При несимметричной нагрузке в трехфазной цепи с нейтральным проводом из-за неравенства токов в фазах в нейтральном проводе возникает ток \dot{I}_N

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &\neq \dot{I}_b \neq \dot{I}_c, \\ \dot{I}_N &= \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c. \end{aligned}$$

Векторная диаграмма напряжений и токов для несимметричной активной нагрузки в фазах имеет вид (рис. 6.5).

При обрыве нейтрального провода потенциал нейтральной точки потребителя (n) электрической энергии, работающего в режиме несимметричной нагрузки, не равен потенциалу нейтральной точки (N) источника. При этом нейтральная точка (n) на векторной диаграмме потребителя сместится из своего первоначального положения в другое, при котором геометрическая сумма фазных токов потребителя равна нулю:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0.$$

В этом случае векторная диаграмма токов и напряжений для несимметричной активной нагрузки примет вид, представленный на рис. 6.6.

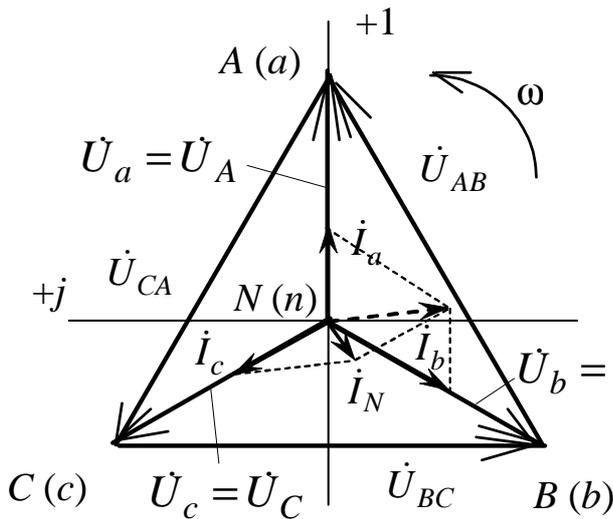


Рис. 6.5

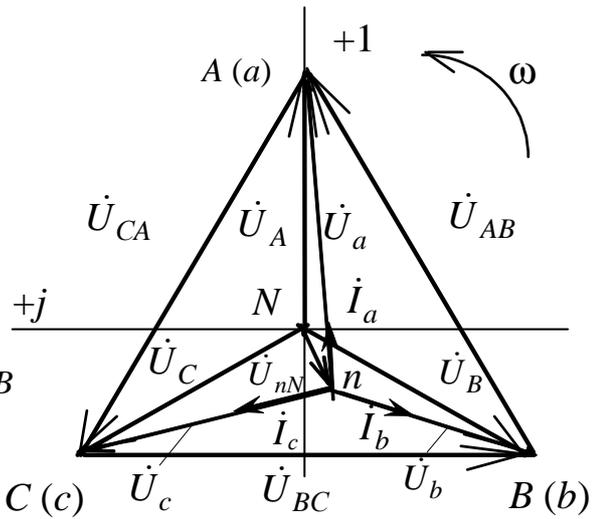


Рис. 6.6

Важной особенностью соединения приемников трехфазной цепи с нейтральным проводом является то, что при изменении сопротивления одной из фаз режимы работы других фаз остаются неизменными, так как фазные напряжения источника образуют симметричную систему и при наличии нейтрального провода полностью переносятся на приемник. Будет изменяться только ток данной фазы, и изменится ток в нейтральном проводе.

Комплексные значения напряжений фаз приемника для несимметричной нагрузки и при отсутствии нейтрального провода можно определить, воспользовавшись уравнениями, составленными согласно второму закону Кирхгофа для соответствующих контуров (на рис. 6.2 приведен контур для определения \dot{U}_a):

$$\begin{cases} \dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN} \\ \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN} \\ \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN} \end{cases},$$

где \dot{U}_{nN} – напряжение смещения между нейтральными точками, В:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\underline{Y}_a \dot{U}_A + \underline{Y}_b \dot{U}_B + \underline{Y}_c \dot{U}_C}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}, \quad (6.3)$$

где $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$ – соответственно, комплексы проводимостей фаз приемника, См;
 \underline{Y}_N – комплекс проводимости нейтрального провода (в рассматриваемом случае $\underline{Y}_N = 0$), См.

С дополнительными сведениями по данному разделу можно ознакомиться в [1 – 4, 6, 7, 9].

6.2. Задачи для самостоятельного решения

Вопросы расчета трехфазных электрических цепей при соединении нагрузки звездой (п. 6.1) рассматриваются в следующих задачах.

Задача 1. Трехфазная симметричная активно-индуктивная нагрузка подключена к трехфазной электрической сети с линейным напряжением 380 В по схеме «звезда». Сопротивления фаз: $R_{\phi} = 2 \text{ Ом}$, $X_{L\phi} = 8 \text{ Ом}$.

Определите токи в фазах приемника. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений. Определите токи в фазах при аварийных режимах:

- а) обрыве фазного провода «а»;
- б) коротком замыкании фазы «а».

Задача 2. В трехфазную сеть с нейтральным проводом и линейным напряжением 380 В включается несимметричная нагрузка $\underline{Z}_a = 30 + j40, \text{ Ом}$, $\underline{Z}_b = 24 + j18, \text{ Ом}$, $\underline{Z}_c = 80 - j60, \text{ Ом}$.

Определите фазные токи и ток в нейтральном проводе. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений.

Задача 3. В трехфазную сеть с нейтральным проводом и линейным напряжением 220 В включается несимметричная нагрузка с сопротивлением $\underline{Z}_a = 10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_b = j10, \text{ Ом}$, $\underline{Z}_c = -j10, \text{ Ом}$. Определите фазные напряжения приемника при обрыве нейтрального провода и напряжение смещения между нейтральными точками \dot{U}_{nN} . Постройте векторную диаграмму напряжений и токов.

6.3. Примеры практической реализации трехпроводной и четырехпроводной трехфазных электрических цепей при соединении нагрузки звездой

Практическая реализация электрических цепей необходима для закрепления усвоения выше изложенных теоретических положений и может быть проведена на универсальном стенде при соблюдении требований, изложенных в Приложении.

Стенд должен содержать:

- индуктивные катушки $L6, L7, L8$ с параметрами ($L = 0,6$ Гн, $R_k = 8$ Ом), расположенные в «Блоке индуктивностей»;
- три ламповых реостата, расположенных в «Блоке нагрузок»;
- батарею конденсаторов $0 \div 62,5$ мкФ, расположенную в «Блоке конденсаторов»;
- блок «Контроль токов» для измерения фазных (линейных) токов, расположенный в «Блоке коммутации»;
- электронные измерительные приборы с автоматическим выбором пределов измерения и рода тока, расположенные в «Блоке измерительных приборов»:
 - а) $pA1$ – амперметр с верхним пределом измерения $2,5$ А для включения в блок «Контроль токов»;
 - б) $pA2$ – амперметр с верхним пределом измерения $1,0$ А для включения в нейтральный провод;
 - в) $pV1$ – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В для измерения фазных и линейных напряжений;
 - г) $pV2$ – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В для измерения напряжения смещения нейтрали.

Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят. Установите напряжение на АТ равным нулю, для этого ручку регулятора напряжения поверните против часовой стрелки до упора.

С целью практической реализации трехфазных электрических цепей при соединении нагрузки звездой предлагаются к рассмотрению следующие электрические схемы.

1. Проверка соотношений между фазными и линейными напряжениями трехфазной сети.

– Измерьте фазные и линейные напряжения источника электрической энергии. Результаты измерений занесите в табл. 6.1.

Убедитесь в выполнении соотношений между фазными и линейными напряжениями (6.2).

Таблица 6.1

Линейные напряжения			Фазные напряжения		
$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$

2. Трехпроводная трехфазная цепь.

– Соберите электрическую цепь (рис. 6.7) для исследования трехфазной цепи без нейтрального провода в случае активной нагрузки (в качестве такой нагрузки используйте ламповые реостаты).

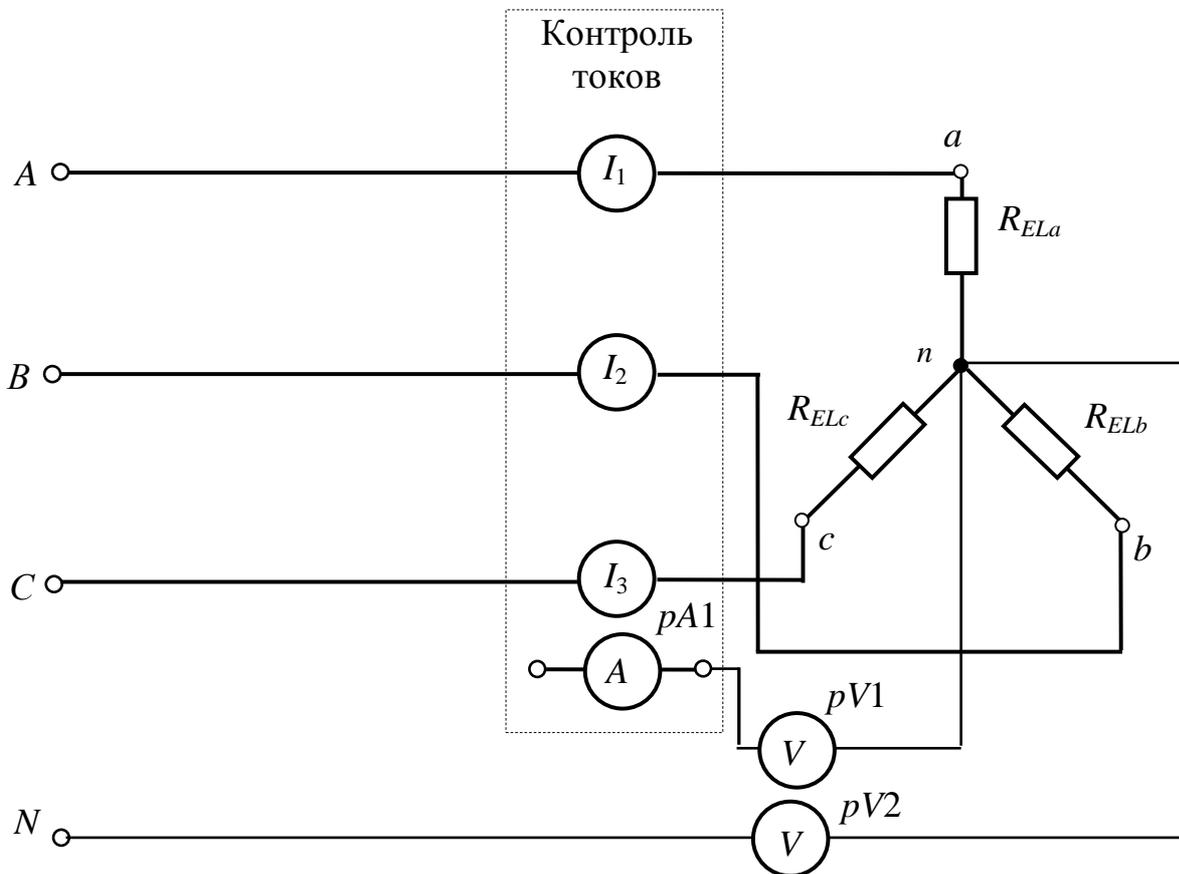


Рис. 6.7

Ламповые реостаты (EL) состоят из четырех ламп накаливания, каждая мощностью 25 Вт. Изменение нагрузки осуществляется соответствующим включением определенного количества ламп в параллельную ветвь (рис. 6.8).

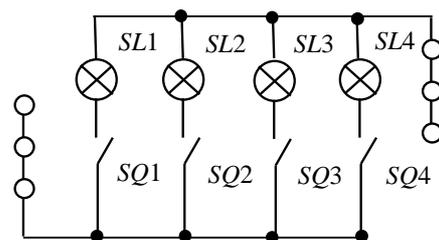


Рис. 6.8

В качестве активно-индуктивной нагрузки ($R-L$) для симметричного режима в фазы последовательно с ламповыми реостатами включите индуктивные катушки $L6$, $L7$, $L8$ (с параметрами $R_k = 8$ Ом и $L = 0,6$ Гн), при этом многооборотный сердечник индуктивной катушки $L8$ должен быть полностью введен (регулятор повернуть по часовой стрелке до упора).

Варианты режимов работы цепи и характера нагрузки задаются преподавателем в соответствии с табл. 6.2.

Таблица 6.2

Режимы работы	Варианты			
	1	2	3	4
Разрыв в фазе	a	b	c	a
Короткое замыкание в фазе	a	b	c	b
Несимметричная активная нагрузка в фазе	a	b	c	c

– Включите тумблеры питания блоков приборов и коммутации.

С помощью переключателя $SA1$ «Блока коммутации» поочередно подключая амперметр $pA1$ и вольтметр $pV1$, измерьте токи в трех фазах нагрузки. Результаты измерений занесите в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Исследуемые режимы	Измеряемые величины						
	$U_a, В$	$U_b, В$	$U_c, В$	$U_{nN}, В$	$I_a, А$	$I_b, А$	$I_c, А$
Симметричная активная нагрузка							
Разрыв в фазе							
Короткое замыкание в фазе							
Несимметричная активная нагрузка							
Симметричная активно-индуктивная нагрузка							

– Определите соотношения между фазными напряжениями источника и приемника.

– Постройте в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов для всех исследуемых режимов.

Угол сдвига фаз между фазным током и напряжением в случаях активно-реактивной нагрузки, необходимый для построения векторных диаграмм, определяется выражениями

$$\varphi = \arctg \frac{X_{\phi}}{R_{\phi}} \quad \text{или} \quad \varphi = \arcsin \frac{X_{\phi}}{Z_{\phi}};$$

– индуктивное сопротивление фазы $X_L = 2\pi fL$;

– полное сопротивление фазы $Z_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}}$;

– активное сопротивление фазы $R_{\phi} = \sqrt{Z_{\phi}^2 - X_{\phi}^2}$.

3. Четырехпроводная трехфазная цепь.

– Соберите электрическую цепь (рис. 6.9) для исследования трехфазной цепи с нейтральным проводом.

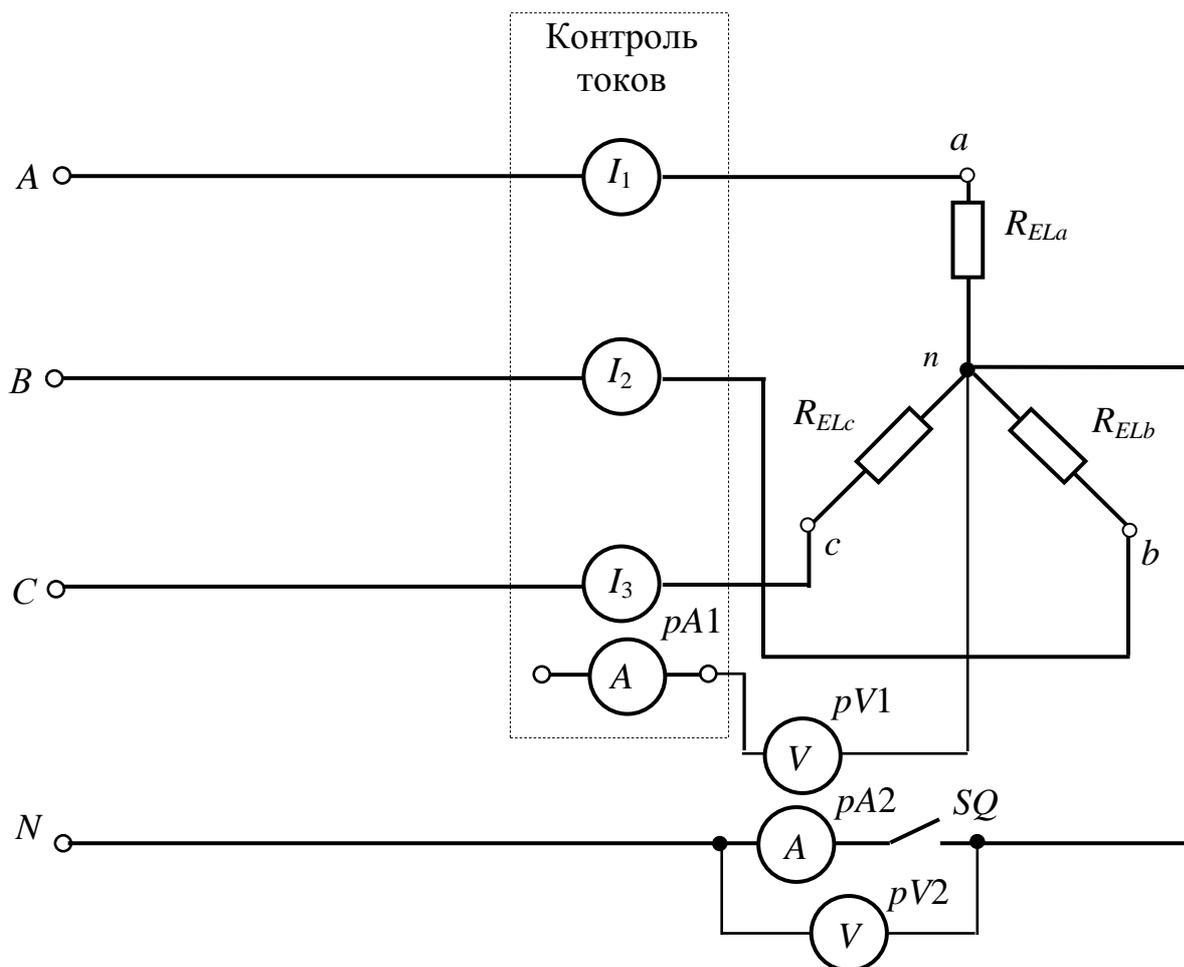


Рис. 6.9

В качестве активно-индуктивной нагрузки ($R-L$) для симметричного режима в фазы последовательно с ламповыми реостатами включите индуктивные катушки $L6$, $L7$, $L8$ (с параметрами $R_k = 8$ Ом и $L = 0,6$ Гн), при этом многооборотный сердечник индуктивной катушки $L8$ должен быть полностью введен (регулятор повернуть по часовой стрелке до упора).

В качестве активно-индуктивной нагрузки ($R-L$) для несимметричного режима рекомендуется использовать индуктивную катушку $L6$, включаемую последовательно с ламповым реостатом.

В качестве активно-емкостной нагрузки ($R-C$) рекомендуется использовать последовательно включенные ламповый реостат и конденсатор емкостью ($8 \div 15$), мкФ.

Варианты режимов работы цепи и характера нагрузки задаются преподавателем в соответствии с табл. 6.4.

Таблица 6.4

Режимы работы	Варианты			
	1	2	3	4
Разрыв в фазе	a	b	c	a
Несимметричная активная нагрузка в фазе	a	b	c	c
Несимметричная активно-реактивная нагрузка	« a » R « b » $R-L$ « c » $R-C$	« a » $R-L$ « b » R « c » $R-C$	« a » $R-C$ « b » $R-L$ « c » R	« a » R « b » $R-C$ « c » $R-L$

– Включите тумблеры питания блоков приборов и коммутации.

С помощью переключателя $SA1$ «Блока коммутации» поочередно подключая амперметр $pA1$ и вольтметр $pV1$, измерьте токи в трех фазах нагрузки. Результаты измерений занесите в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Исследуемые режимы	Измеряемые величины							
	$U_a, В$	$U_b, В$	$U_c, В$	$U_{nN}, В$	$I_a, А$	$I_b, А$	$I_c, А$	$I_n, А$
Симметричная активная нагрузка								
Разрыв в фазе								
Несимметричная активная нагрузка								
Несимметричная активно-реактивная нагрузка								
Обрыв нейтрального провода при несимметричной активно-реактивной нагрузке								

– Определите соотношения между фазными напряжениями источника и приемника.

– Постройте в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов для всех режимов.

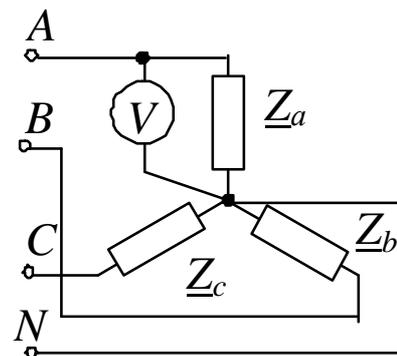
При расчете угла сдвига фаз между фазными током и напряжением в случаях активно-реактивной нагрузки для построения векторных диаграмм необходимо учитывать, что емкостное сопротивление фазы определяется выражением

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}.$$

Контрольные вопросы

1. Поясните назначение нейтрального провода. Почему плавкие предохранители и выключатели необходимо ставить в фазные провода, а не в цепь нулевого рабочего проводника?

2. В трехфазной цепи вольтметром было измерено напряжение – 220 В. Определите фазное и линейное напряжения в этой цепи.



3. Действующее значение линейного тока в симметричном приемнике, соединенном по схеме «звезда» без нейтрального провода, равно I . В одном из линейных проводов произошел обрыв. Чему равны токи в двух других линейных проводах?

4. Трехфазный приемник соединен по схеме «звезда с нейтральным проводом». Фазные токи в приемнике равны соответственно 50, 80 и 20 А и сдвинуты относительно фазных напряжений соответственно на углы -30° , -60° и $+60^\circ$. Изобразите векторную диаграмму напряжений и токов.

5. Изобразите векторную диаграмму напряжений и токов для трехфазной системы, соединенной по схеме «звезда с нейтральным проводом», если в одну фазу включен элемент с сопротивлением R , во вторую – с индуктивностью L , в третью – с емкостью C .

6. В трехпроводную трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В включен трехфазный симметричный потребитель, фазы которого соединены по схеме «звезда». Активное и индуктивное сопротивления фаз потребителя: $R = 3$ Ом и $X_L = 4$ Ом, активное и индуктивное сопротивления каждого провода питающей линии: $R_{л} = 3$ Ом, $X_{л} = 4$ Ом. Определите токи в линейных проводах, активную, реактивную и полную мощности, а также коэффициент мощности потребителя.

ГЛАВА 7

ТРЕХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Данная глава посвящена рассмотрению режимов работы трехфазной электрической цепи при соединении приемников треугольником и особенностям построения векторных диаграмм напряжений и токов.

В результате изучения данного раздела студенты должны:

- знать основы расчета трехфазных цепей, особенности работы трехфазных цепей при соединении нагрузки треугольником;
- уметь выполнять расчеты и строить векторные диаграммы напряжений и токов для трехфазных цепей при соединении приемников треугольником;
- иметь навыки работы с электротехническими устройствами, включенными в трехфазные цепи.

7.1. Анализ работы трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки треугольником

При включении трех фаз приемника с фазными сопротивлениями \underline{Z}_{ab} , \underline{Z}_{bc} , \underline{Z}_{ca} непосредственно между линейными проводами трехпроводной цепи образуется соединение приемников *треугольником* (рис. 7.1); при этом конец предыдущей фазы соединяется с началом следующей.

Если пренебречь сопротивлениями линейных проводов, то фазные напряжения приемника будут равны соответствующим линейным напряжениям источника электрической энергии $U_{\phi} = U_{л}$, то есть

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB}; \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC}; \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA}.$$

Фазные токи определяются следующими соотношениями:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}, \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}, \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}. \quad (7.1)$$

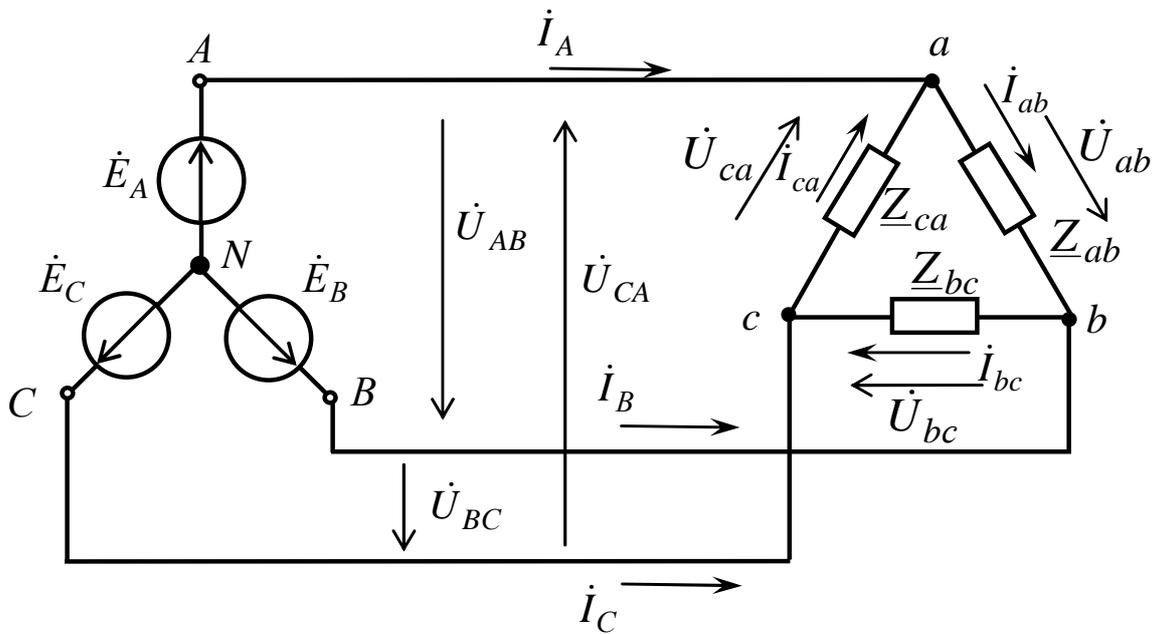


Рис. 7.1

Линейные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ связаны с фазными токами уравнениями, составленными согласно первому закону Кирхгофа для узлов «a», «b», «c»:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \end{cases} \quad (7.2)$$

Вектор любого из линейных токов равен геометрической разности соответствующих векторов токов тех двух фаз приемника, которые соединяются с данным линейным проводом.

При *симметричной* нагрузке $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z} = \underline{Z}e^{j\varphi}$ фазные токи равны по величине, и углы сдвига фаз токов по отношению к соответствующим фазным напряжениям одинаковы. Например, для схемы (рис. 7.2, а) векторная диаграмма напряжений и токов имеет вид (рис. 7.2, б).

Из диаграммы следует, что при симметричной нагрузке соотношение между фазными и линейными токами

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}.$$

Расчет модулей токов при симметричной нагрузке может производиться только для одной фазы:

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} \quad \text{и} \quad I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}. \quad (7.3)$$

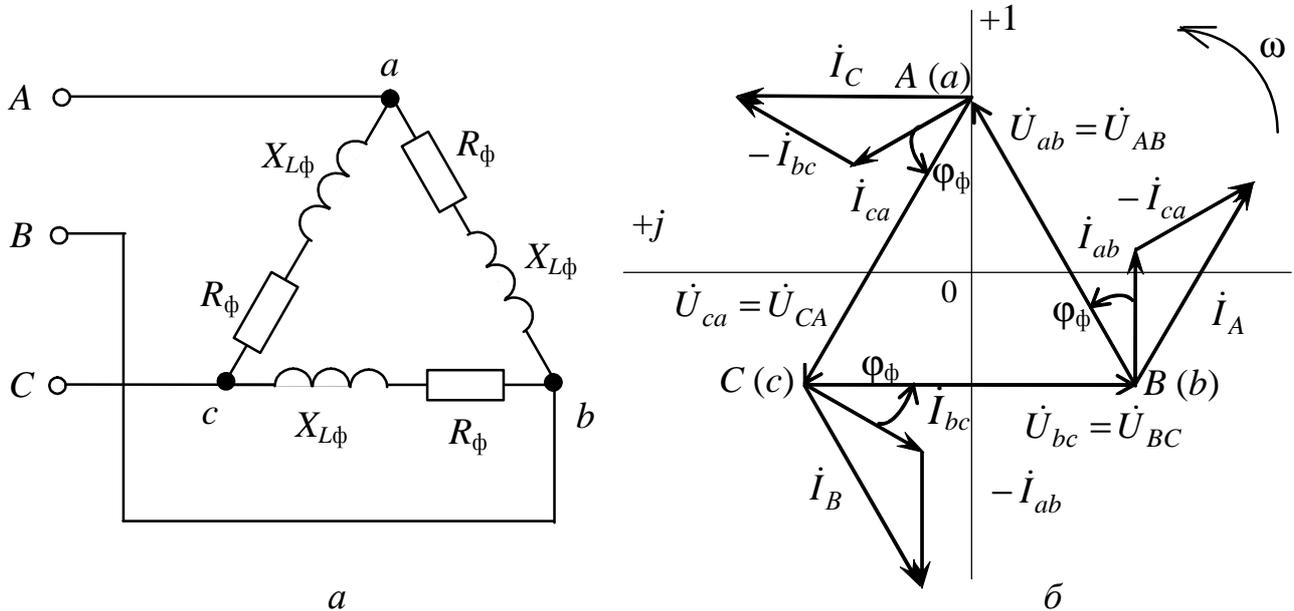


Рис. 7.2

При *несимметричной* нагрузке (рис. 7.3, а, б) линейные и фазные токи определяются по формулам (7.1) и (7.2), но вследствие несимметрии нагрузки векторы токов уже не образуют симметричную систему. Независимо от характера нагрузки геометрическая сумма векторов линейных токов будет равна нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \quad (7.4)$$

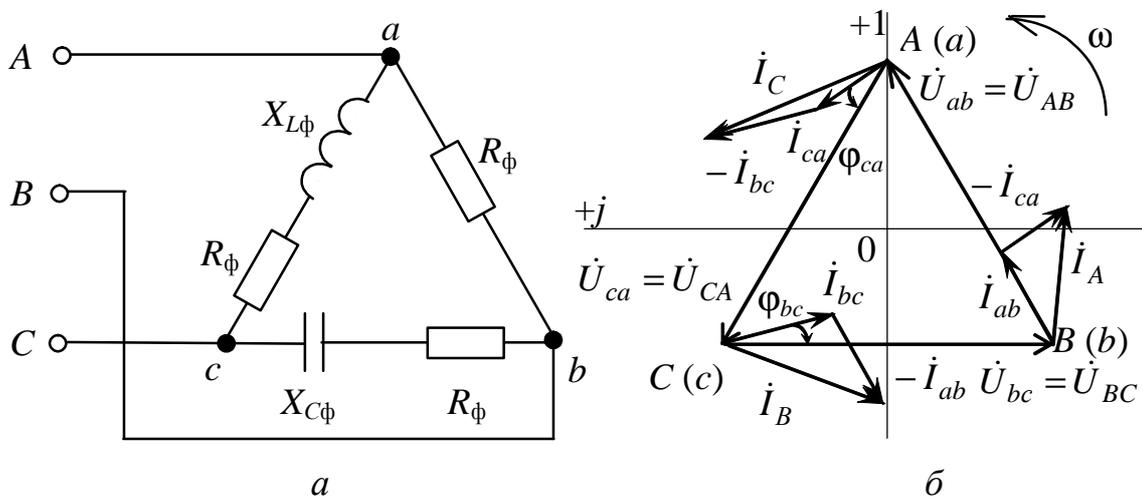


Рис. 7.3

Важной особенностью соединения фаз приемника треугольником является то, что при изменении сопротивления одной из фаз режимы работы других фаз останутся неизменными, так как линейные напряжения источника, а следовательно, и фазные напряжения приемника не меняются (будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах линий, соединенных с этой фазой). Например, для схемы (см. рис. 7.3, а) векторная диаграмма напряжений и токов имеет вид (рис. 7.3, б).

Мощности трехфазной системы как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке, соединенной по схеме «треугольник», рассчитываются по следующим выражениям:

– активная мощность

$$\begin{aligned} P &= P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = \\ &= U_{ab}I_{ab} \cos \varphi_{ab} + U_{bc}I_{bc} \cos \varphi_{bc} + U_{ca}I_{ca} \cos \varphi_{ca} = \\ &= R_{ab}I_{ab}^2 + R_{bc}I_{bc}^2 + R_{ca}I_{ca}^2, \text{ Вт}; \end{aligned} \quad (7.5)$$

– реактивная мощность

$$\begin{aligned} Q &= Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca} = \\ &= U_{ab}I_{ab} \sin \varphi_{ab} + U_{bc}I_{bc} \sin \varphi_{bc} + U_{ca}I_{ca} \sin \varphi_{ca}, \text{ вар}; \end{aligned} \quad (7.6)$$

– полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ ВА, но } S \neq S_{ab} + S_{bc} + S_{ca}. \quad (7.7)$$

В частном случае – при симметричной нагрузке и любой схеме соединения приемников:

– активная мощность

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi_{\phi}; \quad (7.8)$$

– реактивная мощность

$$Q = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi_{\phi} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi_{\phi}; \quad (7.9)$$

– полная мощность

$$S = 3U_{\phi}I_{\phi} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (7.10)$$

С дополнительными сведениями по данному разделу можно ознакомиться в [1 – 3, 6].

7.2. Задачи для самостоятельного решения

Вопросы расчета трехфазных электрических цепей при соединении нагрузки треугольником (п. 7.1) рассматриваются в следующих задачах.

Задача 1. К трехфазной сети с напряжением 380 В подключены три одинаковых приемника ($R_{\phi} = 3 \text{ Ом}$, $X_{L\phi} = 4 \text{ Ом}$), соединенные по схеме «треугольник» (см. рис. 7.2, а).

Определите токи в фазных и линейных проводах и потребляемые мощности (активную, реактивную, полную). Постройте векторную диаграмму напряжений и токов. Рассмотрите аварийные режимы: обрыв фазного провода и обрыв линейного провода.

Задача 2. В трехфазную сеть с напряжением 380 В и частотой $f = 50 \text{ Гц}$ включен трехфазный асинхронный двигатель, фазные обмотки статора которого соединены по схеме «треугольник». Потребляемая активная мощность $P = 1,44 \text{ кВт}$, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,85$.

Определите потребляемый двигателем ток, токи в обмотках двигателя, активное и индуктивное сопротивления, индуктивность катушек, полную и реактивную потребляемые мощности.

Задача 3. К трехпроводной трехфазной линии с напряжением 380 В подключены три однофазных приемника с параметрами: $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 6 \text{ Ом}$, $X_{L2} = 8 \text{ Ом}$, $R_3 = 4 \text{ Ом}$, $X_{C3} = 3 \text{ Ом}$.

Определите токи в фазах и линейных проводах, активную, реактивную и полную мощности и постройте векторную диаграмму напряжений и токов.

Задача 4. К трехфазной сети с напряжением 220 В подключен приемник с сопротивлением $\underline{Z} = (20 - j30) \text{ Ом}$ в каждой фазе.

Определите фазные и линейные токи, показание каждого ваттметра и активную мощность, потребляемую всей нагрузкой (рис. 7.4).

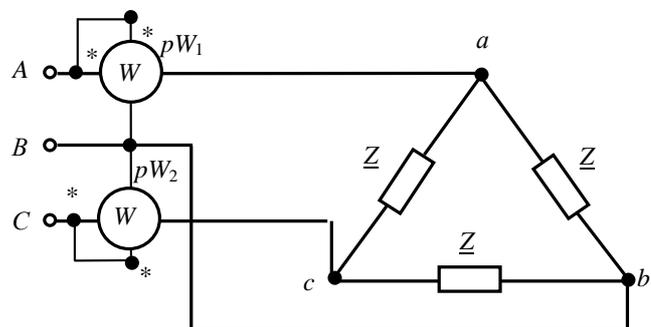


Рис. 7.4

Задача 5. К трехфазной сети с напряжением 220 В присоединены треугольником электрические лампы мощностью: в фазе «*ab*» – 1100 Вт, в фазе «*bc*» – 2500 Вт, в фазе «*ca*» – 500 Вт.

В сети произошел обрыв линейного провода «*c*». Вычислите фазные и линейные токи, полагая сопротивления ламп неизменными.

7.3. Примеры практической реализации трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки треугольником

Практическая реализация электрических цепей необходима для закрепления усвоения выше изложенных теоретических положений и может быть проведена на универсальном стенде при соблюдении требований, изложенных в Приложении.

Стенд должен содержать:

- три ламповых реостата, расположенные в «Блоке нагрузок»;
- индуктивную катушку L_6 с параметрами ($L = 0,6$ Гн, $R = 8$ Ом), расположенную в «Блоке индуктивностей»;
- батарею конденсаторов $0\div 62,5$ мкФ, расположенную в «Блоке конденсаторов»;
- блок «Контроль токов (I_1, I_2, I_3)» для измерения линейных токов, расположенный в «Блоке коммутации»;
- блок «Контроль токов (I_4, I_5, I_6)» для измерения фазных токов, расположенный в «Блоке коммутации»;
- электронные измерительные приборы с автоматическим выбором пределов измерения и рода тока, расположенные в «Блоке измерительных приборов»:
 - а) $pA1$ – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А для включения в блок «Контроль токов (I_1, I_2, I_3)»;
 - б) $pA2$ – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А для включения в блок «Контроль токов (I_4, I_5, I_6)»;
 - в) pV – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В для измерения фазных и линейных напряжений.

Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят. Установите напряжение на АТ равным нулю, для этого ручку регулятора напряжения поверните против часовой стрелки до упора.

С целью практической реализации трехфазных электрических цепей при соединении нагрузки треугольником предлагается к рассмотрению следующая электрическая схема.

1. Трехпроводная трехфазная цепь.

– Соберите электрическую цепь (рис. 7.5), используя ламповые реостаты.

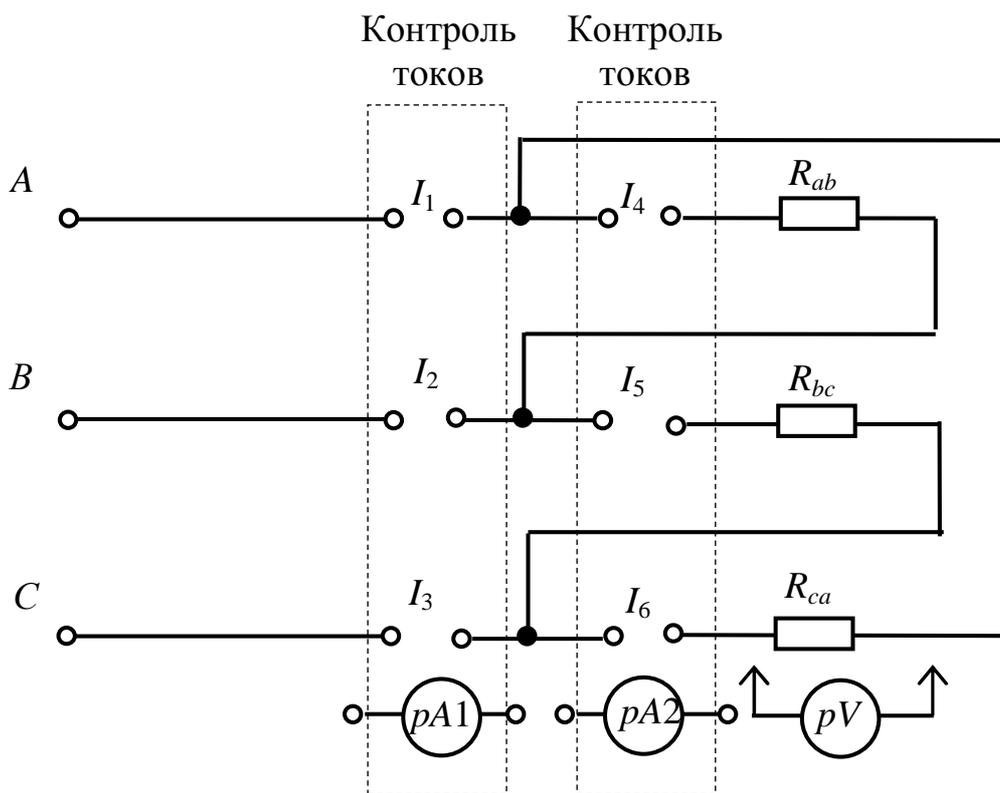


Рис. 7.5

Ламповые реостаты (EL) состоят из четырех ламп накаливания, каждая мощностью 25 Вт.

Изменение нагрузки лампового реостата осуществляется соответствующим включением определенного количества ламп в параллельную ветвь (рис. 7.6).

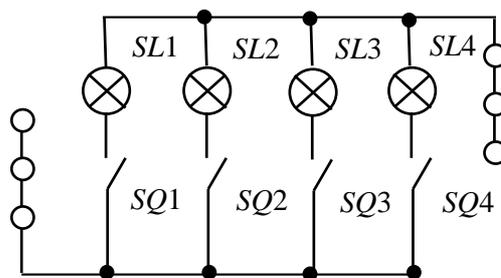


Рис. 7.6

В качестве активно-индуктивной нагрузки ($R-L$) для несимметричного режима рекомендуется использовать индуктивную катушку L_6 с параметрами $R_k = 8$ Ом и $L = 0,6$ Гн, включаемую последовательно с ламповым реостатом.

В качестве активно-емкостной нагрузки ($R-C$) рекомендуется использовать последовательно включенные ламповый реостат и конденсатор емкостью $8 \div 12$ мкФ.

Варианты режимов работы цепи и характера нагрузки задаются преподавателем в соответствии с табл. 7.1.

Таблица 7.1

Название режима	Варианты			
	1	2	3	4
Обрыв фазы при симметричной активной нагрузке	ab	bc	ca	ab
Обрыв линии при симметричной активной нагрузке	A	B	C	B
Несимметричная активная нагрузка	ab	bc	ca	ca
Несимметричная активно-реактивная нагрузка	« ab » R « bc » $R-C$ « ca » $R-L$	« ab » $R-C$ « bc » R « ca » $R-L$	« ab » $R-L$ « bc » $R-C$ « ca » R	« ab » R « bc » $R-L$ « ca » $R-C$

– Включите тумблеры блоков питания приборов и коммутации.

С помощью переключателя $SA1$ «Блока коммутации» поочередно подключая амперметр $pA1$ в линейные провода, измерьте линейные токи.

С помощью переключателя $SA2$ «Блока коммутации» поочередно подключая амперметр $pA2$ в фазные провода, измерьте токи в трех фазах нагрузки.

При выполнении аварийных режимов рекомендуется в целях безопасности работы полностью удалять из цепи «поврежденный» фазный или линейный провода.

Результаты измерений занесите в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Исследуемые режимы	Измеряемые величины								
	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{ca},$ А	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А
Симметричная активная нагрузка									
Обрыв фазы при симметричной активной нагрузке									
Обрыв линии при симметричной активной нагрузке									
Несимметричная активная нагрузка									
Несимметричная активно-реактивная нагрузка									

– Определите соотношение между линейными и фазными токами в трехфазной цепи при симметричном режиме работы, используя результаты измерений из табл. 7.2.

– Постройте в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов для всех режимов исследуемой цепи и проверьте выполнение условия (7.4).

Угол сдвига фаз между током и напряжением в случаях активно-реактивной нагрузки, необходимый для построения векторных диаграмм, определяется выражениями

$$\varphi = \arctg \frac{X_{\phi}}{R_{\phi}} \quad \text{или} \quad \varphi = \arcsin \frac{X_{\phi}}{Z_{\phi}};$$

– индуктивное сопротивление фазы $X_L = 2\pi fL$;

– емкостное сопротивление фазы $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$;

– полное сопротивление фазы $Z_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}}$;

– активное сопротивление фазы $R_{\phi} = \sqrt{Z_{\phi}^2 - X_{\phi}^2}$.

Соотношение между линейными и фазными токами при симметричной нагрузке необходимо определить по результатам табл. 7.2 и сравнить с соотношением (7.3).

2. Вычисление мощностей трехфазной цепи.

При расчете активных, реактивных и полных мощностей рекомендуется воспользоваться выражениями (7.5 – 7.10). Результаты вычислений мощности занесите в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Исследуемые режимы	Расчетные величины								
	P_{ab} , Вт	P_{bc} , Вт	P_{ca} , Вт	Q_{ab} , вар	Q_{bc} , вар	Q_{ca} , вар	P , Вт	Q , вар	S , ВА
Симметричная активная нагрузка									
Несимметричная активная нагрузка									
Несимметричная активно-реактивная нагрузка									

Контрольные вопросы

1. Как определяется соотношение между фазными и линейными напряжениями и токами при соединении потребителей треугольником при симметричной нагрузке?

2. В чем достоинства и недостатки способа соединения потребителей треугольником?

3. Как влияет изменение режима работы одной из фаз потребителя, соединенного треугольником, на режим работы других фаз и на линейные токи?

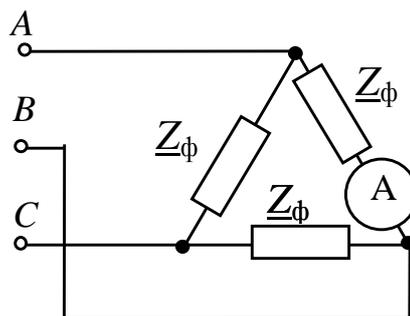
4. Напишите выражения для активной, реактивной и полной мощностей трехфазной системы.

5. Как изменится активная потребляемая мощность симметричного приемника, соединенного треугольником, при обрыве одной из фаз?

6. К трехфазной сети подключен электродвигатель, обмотки статора которого соединены по схеме «звезда». Для повышения коэффициента мощности цепи подключены конденсаторы, соединенные треугольником. Начертите соответствующую схему.

7. Приемник соединен треугольником. В фазу ab включен реостат, в фазу bc – катушка (L, R), в фазу ca – конденсатор. Начертите векторную диаграмму напряжений и токов.

8. В трехфазной цепи при симметричной нагрузке амперметром был измерен ток – 2 А. Определите фазные и линейные токи, а также напряжения источника, если $Z_{\phi} = 80 - j60, \text{ Ом}$.



9. К трехфазной сети с напряжением 220 В подключены приемники, соединенные по схеме «треугольник» и имеющие одинаковые активные мощности 76 кВт, но различные коэффициенты мощности : $\cos \varphi_{ab} = 0,80$; $\cos \varphi_{bc} = 0,90$; $\cos \varphi_{ca} = 0,85$. Вычислите фазные и линейные токи и постройте векторную диаграмму токов и напряжений, полагая $\varphi_{ab} > 0$, $\varphi_{bc} > 0$, $\varphi_{ca} > 0$.

10. По условиям контрольного вопроса 9 составьте эквивалентную схему цепи и определите ее параметры, приняв $\varphi_{ab} > 0$, $\varphi_{bc} > 0$, $\varphi_{ca} < 0$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие «Электротехника и электроника. Часть I. Электрические цепи» является составной частью учебно-методического комплекса (УМК) дисциплин «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника», «Электротехника», «Электротехника. Электроника», «Электротехника, электроника и основы схемотехники», «Теоретическая электротехника», включающего в себя сведения о структуре соответствующей дисциплины, ее содержании, а также рекомендации студентам по самостоятельной работе. Все перечисленные дисциплины имеют схожую структуру и содержание, отсюда и общее название – «Электротехника и электроника».

В учебном пособии «Электротехника и электроника. Часть I. Электрические цепи» рассмотрены теория и варианты практической реализации электрических цепей постоянного тока, однофазного синусоидального, а также резонансных явлений в электрических цепях синусоидального тока, и трехфазных цепей при соединении нагрузки звездой и треугольником. С целью более глубокого усвоения теоретического материала приведены задачи для самостоятельного решения, а также контрольные вопросы для самопроверки. Структуры учебного пособия «Электротехника и электроника. Часть II. Электромагнитные устройства» и учебного пособия «Электротехника и электроника. Часть III. Электропривод и электроника» аналогичны; причем часть II посвящена вопросам многополюсных систем, переходных процессов, магнитных цепей, трансформаторов и электрических машин, а часть III – вопросам электропривода и применению электронных устройств. В связи с этим нумерация глав во всех трех частях выполнена сквозной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беневоленский С. Б., Марченко А. Л.* Основы электротехники: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2006. – 568 с.

2. *Иванов И. И., Соловьев Г. И., Фролов В. Я.* Электротехника и основы электроники [Электронный ресурс]: учебник. – 7-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Лань, 2012. – 736 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – Доступ по логину и паролю из сети Интернет <URL:<http://e.lanbook.com/>>.

3. *Касаткин А. С., Немцов М. В.* Электротехника: учебник. – 11-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 539 с.

4. *Опорный* конспект по электротехнике: метод. указания к изучению дисциплины «Электротехника и электроника» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост.: Р. В. Ахмадеев, И. В. Вавилова, П. А. Грахов, Т. М. Крымская, Р. Г. Фаррахов. – Уфа, 2009. – 28 с.

5. *Практикум* по электротехнике и электронике: учеб. пособие / В. В. Кононенко, В. И. Мишкович, В. Ф. Планидин, П. М. Чеголин. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 384 с.

6. *Электротехника* и электроника. Электрические и магнитные цепи: учеб. пособие / Р. В. Ахмадеев [и др.]. – Уфа, 2009. – 147 с.

7. *Жаворонков М. А., Кузин А. В.* Электротехника и электроника: учеб. пособие – 3-е изд., стер. – М.: Академия, 2010. – 400 с.

8. *Прянишников В. А., Петров Е. А., Осипов Ю. М.* Электротехника и ТОО в примерах и задачах: практическое пособие – СПб.: Корона – Век, 2008. – 334с.

9. *Белов Н. В., Волков Ю. С.* Электротехника и основы электроники [Электронный ресурс]: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2012. – 432 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – Доступ по логину и паролю из сети Интернет <URL:<http://e.lanbook.com/>>.

Основные правила техники безопасности при работе с электротехническим оборудованием

Для выполнения требований техники безопасности НЕОБХОДИМО:

- приступать к работе, прослушав инструктаж;
- не загромождать свое рабочее место оборудованием, не относящимся к работе;
- перед началом сборки цепи убедиться, что питание электротехнического оборудования отключено;
- использовать оборудование с исправными клеммами, провода с неповрежденной изоляцией;
- не прикасаться к зажимам отключенных конденсаторов; разрядить конденсатор до сборки электрической цепи и после окончания работы, замкнув его выводы накоротко проводником;
- без разрешения ответственного лица не включать собранную электрическую цепь;
- отключать цепь от источника питания при любых переключениях и пересоединениях;
- немедленно отключить цепь от источника питания при появлении дыма, специфического запаха горелой изоляции, при исчезновении напряжения на главном распределительном щите лаборатории.

Правила сборки электрической цепи

При сборке электрической цепи рекомендуется пользоваться следующими правилами:

- при сборке электрической цепи в первую очередь собирается последовательная (токовая) цепь, а затем подключаются параллельные ветви; ветви, состоящие из вольтметров, параллельных обмоток ваттметров, фазометров, подсоединяются в последнюю очередь;
- при подключении какого бы то ни было элемента, не имеющего обозначения полярности, входной клеммой считается левая (верхняя), а выходной – правая (нижняя); если же имеются

обозначения «плюс» и «минус», то входной считается положительный зажим;

– перед включением электрической цепи регуляторы напряжения устанавливаются в положение, обеспечивающее минимальный ток во всех его элементах, делители напряжения – на минимум напряжения на выходе, сопротивления реостатов увеличиваются до максимума;

– напряжение на исследуемую электрическую цепь подается только после ее проверки преподавателем;

– вносить изменения в электрическую цепь, разбирать ее можно только с разрешения преподавателя после отключения всех источников питания.

Программа практической реализации электрических цепей считается выполненной после утверждения результатов преподавателем и отметок о проделанной работе в журнале и в отчете студента.

Составление отчета по результатам практической реализации электрических цепей

Студент составляет индивидуальный отчет по результатам каждой выполненной работы.

Отчет должен содержать:

- название и цель работы;
- результаты самостоятельного решения задач;
- принципиальную схему экспериментальной установки;
- таблицы экспериментальных данных и необходимых вычислений;
- основные расчетные формулы;
- графики и векторные диаграммы токов и напряжений;
- выводы.

Элементы электрических схем и графики, изображенные в отчете, выполняются с применением чертежных инструментов или соответствующих пакетов прикладных программ с соблюдением требований ГОСТ.

Графики изображаются в прямоугольной системе координат в масштабе (с равномерными шкалами).

Допускается изображение на одном рисунке нескольких графиков. При этом для каждого графика может быть свой масштаб по оси ординат (рис. П1). Построение графиков производится на миллиметровой бумаге, которая вклеивается в отчет. Масштабы рекомендуется выбирать такими, чтобы графики были размером 10 – 15 см на 12 – 18 см, считая больший размер по оси абсцисс.

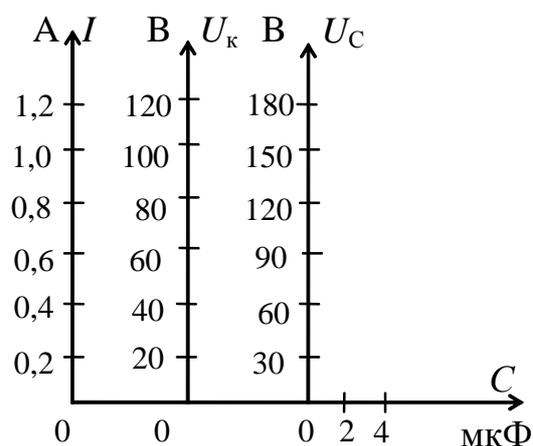


Рис. П1

Векторные диаграммы токов и векторно-топографические диаграммы напряжений выполняются с точным соблюдением углов и масштабов.

Критериями оценки усвоения материала данного пособия являются:

- степень реализации цели и задач;
- степень овладения запланированными умениями и навыками;
- степень соответствия результатов практической реализации электрических схем заданным требованиям.