

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

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ,
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА И
ЭЛЕКТРОНИКА**

**Лабораторный практикум
по дисциплине
«Электротехника и электроника»
Часть I**

Уфа 2016

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

Кафедра теоретических основ электротехники

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ,
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум
по дисциплине
«Электротехника и электроника»
Часть I

Уфа 2016

Составители: 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

Электрические цепи, электромагнитные устройства и электроника: Лабораторный практикум по дисциплине «Электротехника и электроника». Часть I / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. Р. В. Ахмадеев, И. В. Вавилова, П. А. Грахов, Т. М. Крымская, В. С. Лукманов, О. В. Мельничук. – Уфа, 2016. – 92 с.

Лабораторный практикум посвящен вопросам экспериментального исследования и теоретического анализа электрических цепей.

Предназначен для студентов вузов неэлектротехнических специальностей, изучающих дисциплины «Электротехника», «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника», «Электротехника. Электроника», «Основы электротехники и электроники».

Данный лабораторный практикум соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования для направлений подготовки бакалавров и специалистов: 13.03.01, 13.03.03, 15.03.01, 15.03.02, 15.03.04, 15.03.05, 15.03.06, 20.03.01, 22.03.01, 23.03.01, 24.03.04, 24.03.05, 25.03.01, 27.03.01, 27.03.04, 27.03.05, 28.03.02, 38.03.01, 15.05.01, 20.05.01, 24.05.02, 27.05.01.

Табл. 17. Ил. 70. Библиогр.: 9 назв.

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. каф. ТОЭ Медведева Л.С.
д-р. техн. наук, проф., зав. каф. ИИТ Ясовеев В.Х.

© Уфимский государственный
авиационный технический университет, 2016

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

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ,
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум
по дисциплине
«Электротехника и электроника»
Часть I

Подписано в печать 2016. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr.

Усл.печ. л. Уч.-изд. л. .

Тираж 100 экз. Заказ №.....

ФГБОУ ВО

Уфимский государственный авиационный технический университет

Редакционно-издательский комплекс УГАТУ

450000, Уфа – центр, ул. К. Маркса,12

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Лабораторно-практическое занятие № 1 Исследование электрической цепи постоянного тока с одним источником электрической энергии.....	9
Лабораторно-практическое занятие № 2 Изучение аналитических методов расчета цепей и их экспериментальная проверка.....	21
Лабораторно-практическое занятие № 3 Анализ однофазных неразветвленных цепей переменного тока с RL - и RC -приемниками.....	32
Лабораторно-практическое занятие № 4 Исследование неразветвленной электрической цепи переменного тока.....	44
Лабораторно-практическое занятие № 5 Исследование разветвленной электрической цепи переменного тока.....	55
Лабораторно-практическое занятие № 6 Исследование трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки звездой.....	68
Лабораторно-практическое занятие № 7 Исследование трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки треугольником.....	81
Список литературы.....	92

ВВЕДЕНИЕ

Основные положения

Данные методические указания являются составной частью учебно-методического комплекса (УМК) дисциплин «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника», «Электротехника. Электроника», «Основы электротехники и электроники», «Электротехника», «Электроника», «Электротехника, электроника и схемотехника», 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».

Методические указания посвящены вопросам экспериментального исследования и теоретического анализа электрических цепей и предназначены для организации и проведения лабораторно-практических занятий студентов, изучающих дисциплину «Электротехника и электроника». Изложение и объем учебного материала соответствуют требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО) 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:

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; 27.03.04 – Управление в технических системах; 27.03.05 – Инноватика; 28.03.02 – Наноинженерия; 38.03.01 – Экономика;
и специалистов:

15.05.01 – Проектирование технологических машин и комплексов; 20.05.01 – Пожарная безопасность; 24.05.02 – Проектирование авиационных и ракетных двигателей; 27.05.01 – Специальные организационно-технические системы.

Описание каждого лабораторно-практического занятия содержит следующие разделы:

- цель и задачи занятия,
- теоретическая часть,
- расчетная часть с типовыми задачами,
- экспериментальная часть с описанием лабораторного оборудования, рабочим заданием и методикой выполнения задания,
- контрольные вопросы.

Изучение теоретической части и решение типовых задач должно способствовать более эффективной теоретической подготовке студентов к выполнению эксперимента.

Целью выполнения лабораторного практикума является:

- обеспечение теоретической и практической подготовки 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,

что обеспечивает формирование профессиональных компетенций ФГОС ВО.

В результате выполнения лабораторных работ формируются следующие компетенции:

- 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*

- самостоятельной работы с электротехническим оборудованием;

- использования теоретических методов расчета для решения практических задач;
- оформления отчета по лабораторной работе с помощью стандартных компьютерных программ;

а также через *владение*

- навыками работы с электротехническим оборудованием и электроизмерительными приборами;
- навыками применения методов расчета электрических цепей и анализа результатов.

Основные правила техники безопасности при работе в электротехнической лаборатории

Для выполнения требований техники безопасности студентам **НЕОБХОДИМО**:

- а) приступать к работе, прослушав инструктаж;
- б) не загромождать свое рабочее место оборудованием, не относящимся к данной работе;
- в) перед началом сборки цепи убедиться, что питание лабораторного стенда отключено;
- г) использовать оборудование с исправными клеммами, провода с неповрежденной изоляцией;
- д) не прикасаться к зажимам отключенных конденсаторов; разрядить конденсатор до сборки электрической цепи и после окончания работы, замкнув его выводы накоротко проводником;
- е) без разрешения преподавателя не включать собранную электрическую цепь;
- ж) отключать цепь от источника питания при любых переключениях и пересоединениях;
- з) 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:

- 1) при сборке электрической цепи в первую очередь собирается последовательная (токовая) цепь, а затем подключаются параллель-

ные ветви; ветви, состоящие из вольтметров, параллельных обмоток ваттметров, фазометров, подсоединяются в последнюю очередь;

2) 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;

3) 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;

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

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

Программа экспериментальной части лабораторной работы считается выполненной после утверждения результатов опытов преподавателем и отметок о проделанной работе в журнале и в отчете студента.

Составление отчета

Студент составляет индивидуальный отчет по каждой выполненной в лаборатории работе.

На первой странице отчета в ее правой верхней четверти помещается таблица, содержащая Ф.И.О. студента, номер группы и этапы выполнения работы.

Фамилия И.О., гр.	Подпись преподавателя	Дата
Выполнение эксперимента		
Оформление работы		
Оценка результатов		

Отчет должен содержать:

- 1) название и цель работы;
- 2) принципиальную схему экспериментальной установки;
- 3) таблицы данных экспериментов и вычислений;

- 4) основные расчетные формулы;
- 5) графики и векторные диаграммы токов и напряжений;
- 6) выводы.

Все записи в отчете должны быть выполнены чернилами. Элементы электрических схем и графики, изображенные в отчете, выполняются карандашом 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.1).

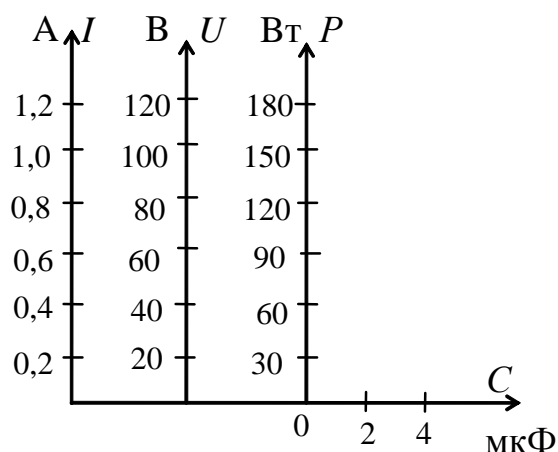


Рис. 1

Построение графиков производится на миллиметровой бумаге, которая клеивается в отчет. Масштабы рекомендуется выбирать такими, чтобы графики были размером 10–15 см на 12–18 см, считая больший размер по оси абсцисс.

Векторные диаграммы токов и напряжений выполняются с точным соблюдением углов, топографические диаграммы – также и с соблюдением масштабов.

Критериями оценки выполнения лабораторной работы являются:

- 1) степень реализации цели и задач работы;
- 2) степень овладения запланированными умениями и навыками;
- 3) степень соответствия результатов работы заданным требованиям.

Выполнение лабораторной работы оценивается – «зачтено» или «незачтено» и учитывается как показатель текущей успеваемости студентов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

1. Цель и задачи занятия

Цель: исследование вольт-амперных характеристик элементов электрической цепи и изучение метода эквивалентных преобразований для расчета электрических схем с одним источником энергии.

В результате выполнения заданий 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.

2. Краткие теоретические сведения

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.

2.1. 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).

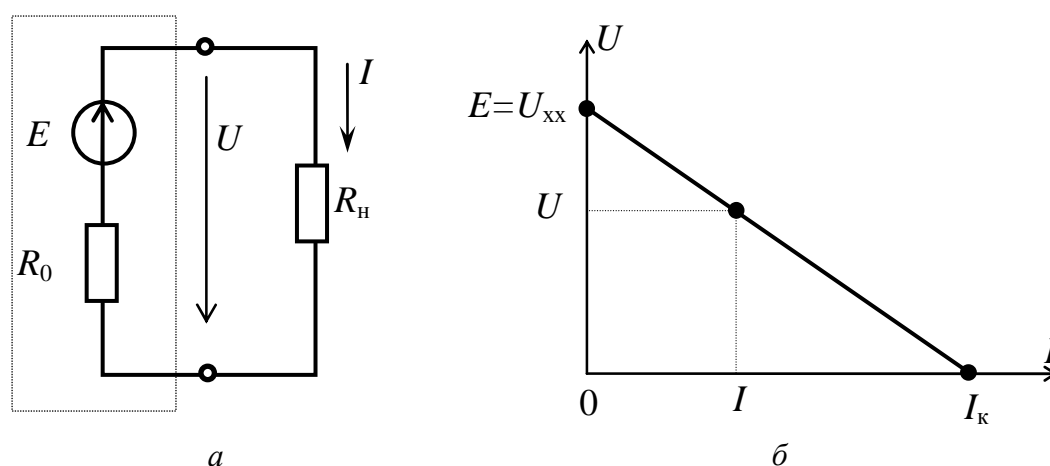


Рис. 1.1

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.

2.2. 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.

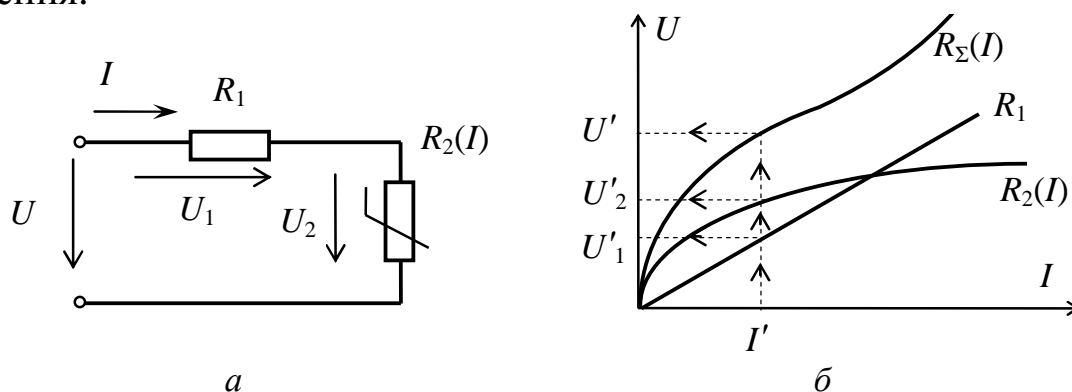


Рис. 1.2

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.

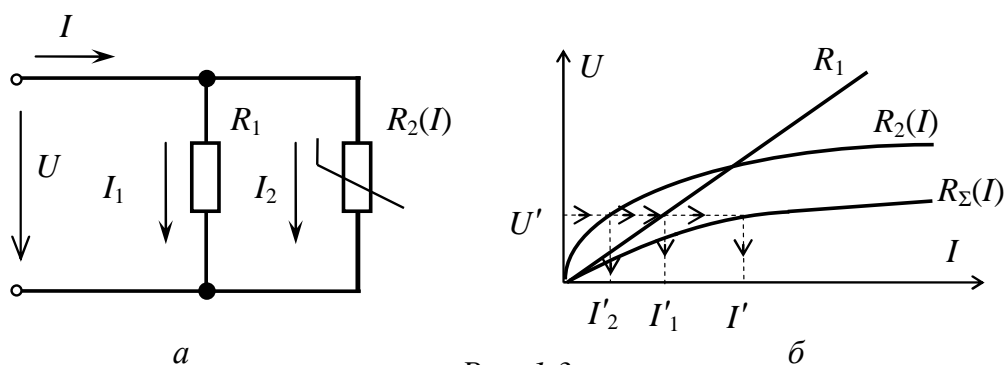


Рис. 1.3

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.

2.3. Методы расчета электрических цепей с одним источником электрической энергии

Основной задачей расчета электрических цепей является определение токов, а далее – напряжений, мощностей в ветвях электрической цепи по заданным величинам сопротивлений ветвей и значений ЭДС. Такая задача носит название задачи 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
$$I = \frac{U_{ab} + E}{R}.$$

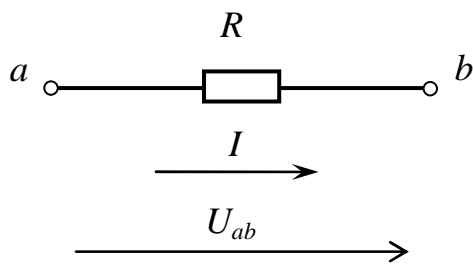


Рис. 1.4

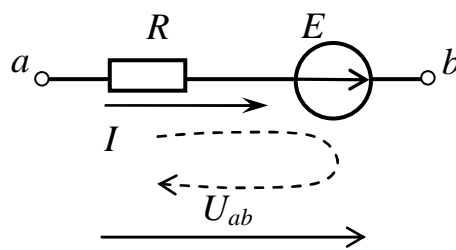


Рис. 1.5

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», эквивалентной «звездой» (рис. 1.6). При этом сопротивления лучей эквивалентной «звезды» определяются по формулам

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

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

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

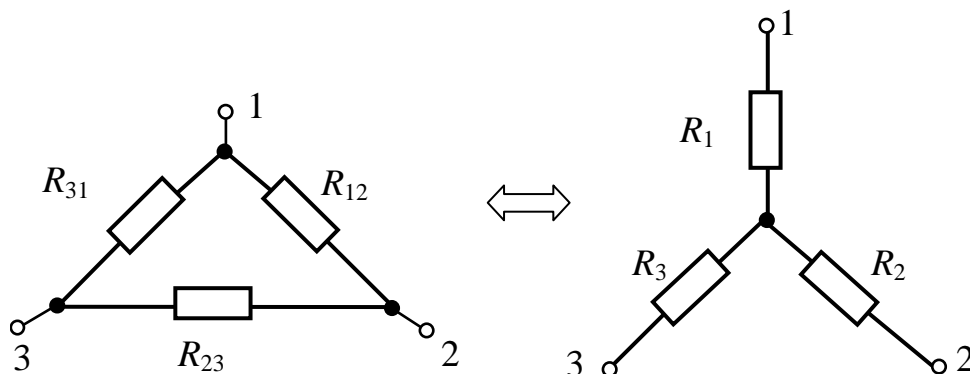


Рис. 1.6

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.

3. Расчетная часть

Задача 1. Генератор постоянного тока бортовой сети самолета 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).

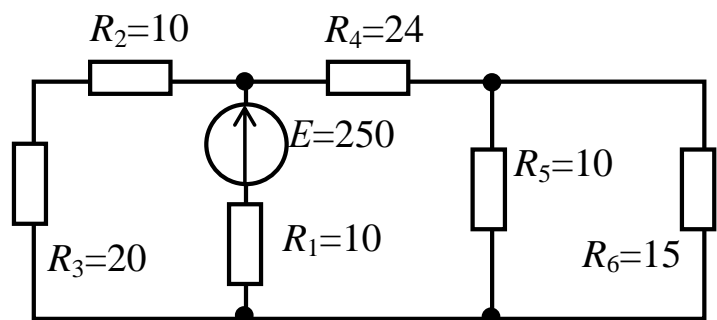


Рис. 1.7

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

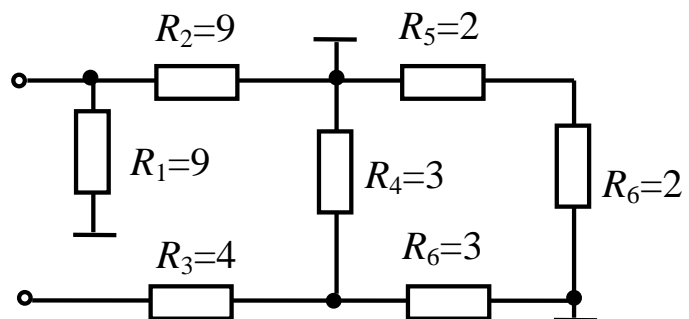


Рис. 1.8

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

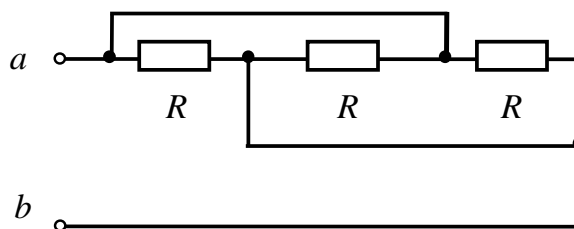


Рис. 1.9

Задача 5. В схеме измерительного моста заданы параметры электрической цепи E [В], R_i [Ом]. Определите ток I (рис. 1.10).

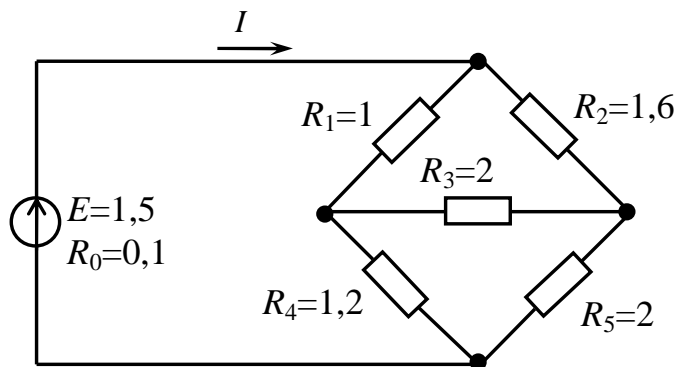


Рис. 1.10

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).

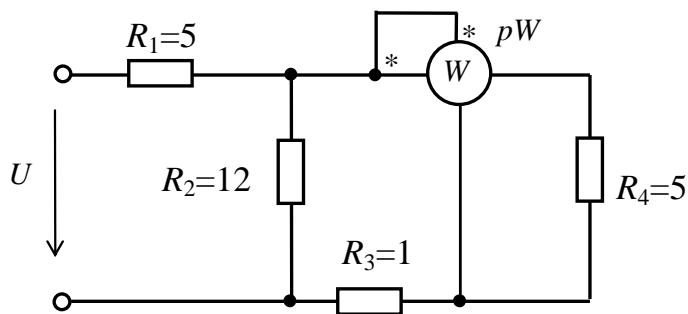


Рис. 1.11

4. Экспериментальная часть

4.1. Описание лабораторного оборудования

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

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

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

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

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

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

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

7) 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.

4.2. Рабочее задание

1. Повторите соответствующие разделы дисциплины [1, 2, 3, 4, 5, 6].

2. Исследование работы источника электрической энергии:

– постройте внешнюю характеристику $U=f(I)$ источника;

– определите параметры источника – ЭДС (E), внутреннее сопротивление (R_0) и ток короткого замыкания (I_k).

3. Исследование вольт-амперных характеристик приемников (линейных и нелинейных) электрической энергии:

– 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.

4. Сделайте выводы по проделанной работе, обратив особое внимание на возможное расхождение экспериментально полученных и теоретически построенных вольт-амперных характеристик последовательного и параллельного соединений приемников.

4.3. Методика выполнения задания

1. 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.

2. Исследование работы источника электрической энергии.

1) Соберите цепь (рис. 1.12).

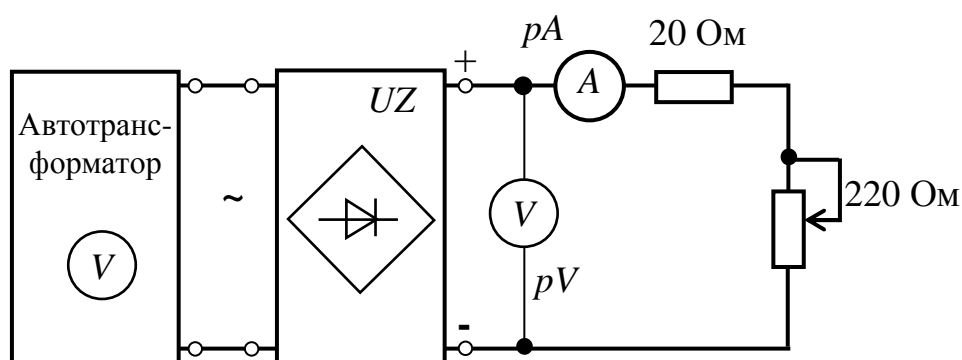


Рис. 1.12

2) 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

$U, В$					
$I, А$					

3. Исследование вольт-амперных характеристик приемников (линейных и нелинейных) электрической энергии и их последовательного и параллельного соединений.

1) Соберите цепь (рис. 1.13).

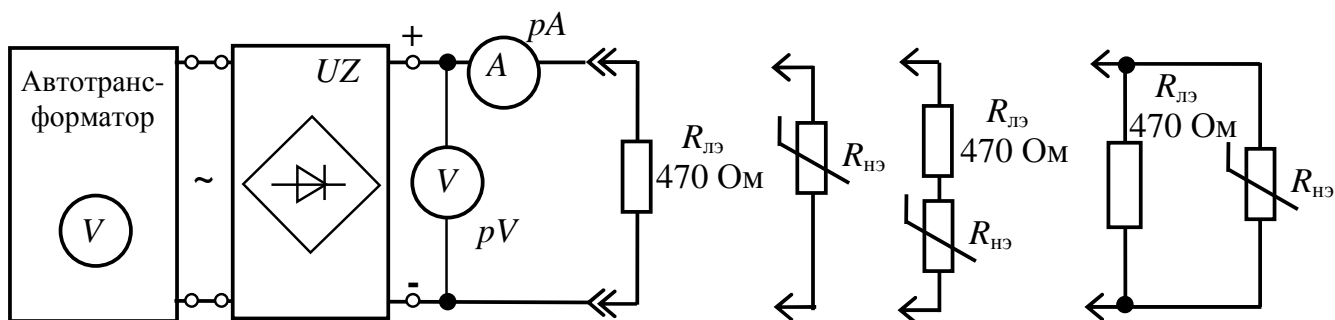


Рис. 1.13

2) 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	$I, А$						
Параллельное соединение	$I, А$						

Методические указания к обработке результатов эксперимента

1) При определении параметров источника ЭДС рекомендуется использовать выражение (1.1).

2) При построении теоретических суммарных вольт-амперных характеристик для последовательного и параллельного соединений линейного и нелинейного элементов рекомендуется использовать теоретические сведения п.2.2 (см. рис. 1.3 – 1.6) и формулы (1.2) и (1.3).

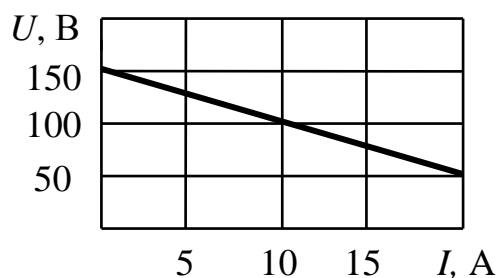
Контрольные вопросы

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



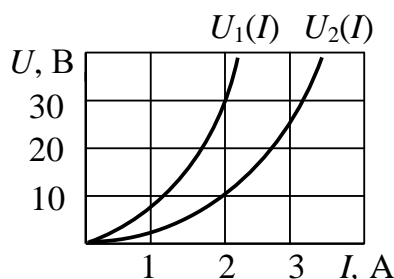
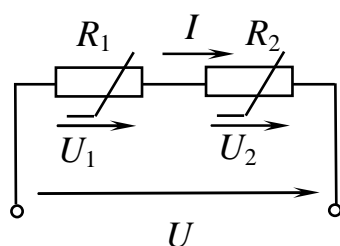
2. Какой вид имеет вольт-амперная характеристика идеальных источников ЭДС и тока?

3. По внешней характеристике источника определите внутреннее сопротивление источника.



4. В чем особенность расчета нелинейных цепей?

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



ИЗУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЦЕПЕЙ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

1. Цель и задачи занятия

Цель: теоретическое и экспериментальное изучение методов анализа разветвленных электрических цепей постоянного тока с двумя и более источниками электрической энергии (на основе законов Кирхгофа, метода междуузлового напряжения и метода эквивалентного генератора).

В результате выполнения заданий студенты должны:

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

2. Краткие теоретические сведения

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. 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 $n_1=(N_y-1)$ уравнений, где N_y – число потенциальных узлов.

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

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.

2.2. Метод междуузлового напряжения

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

Пусть между двумя узлами (например, a и b) включено m ветвей. Тогда напряжение между узлами U_{ab} определяется в соответствии с выражением (условно-положительное направление напряжения U_{ab} – от узла « a » к узлу « b ») при отсутствии 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.

2.3. 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.

2.4. 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;

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

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

3. Расчетная часть

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

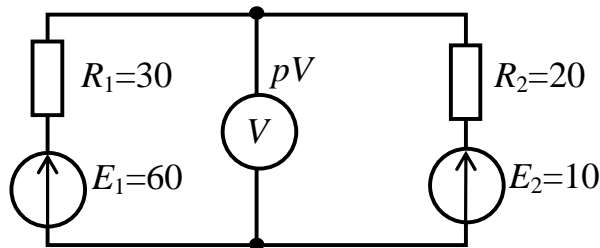


Рис. 2.1

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

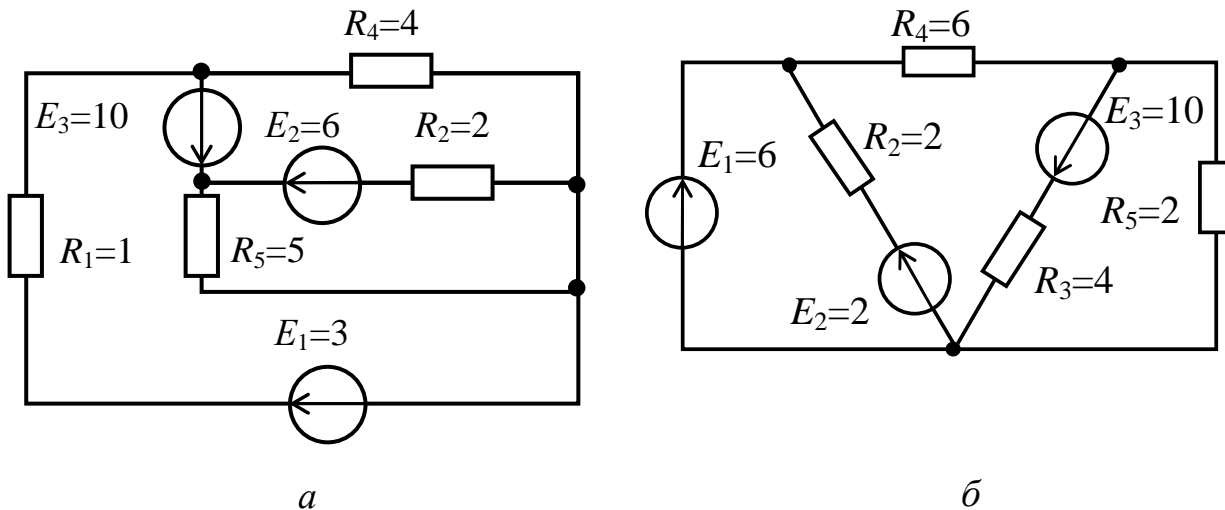


Рис. 2.2

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

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

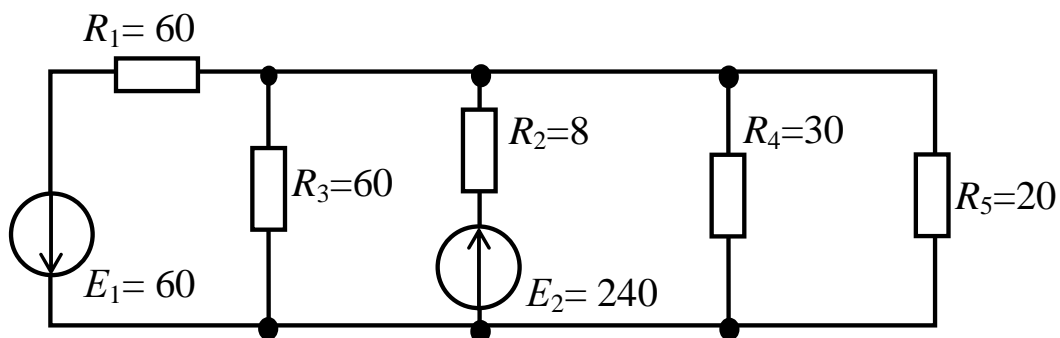


Рис. 2.3

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

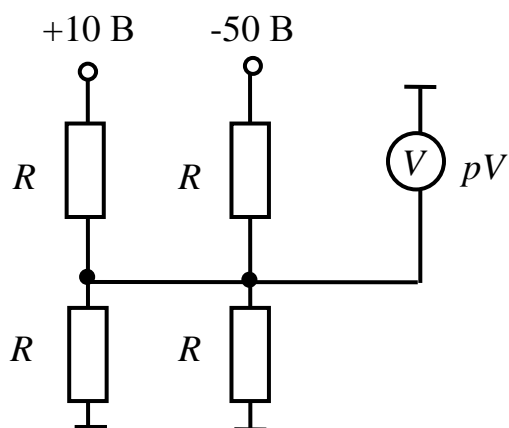


Рис. 2.4

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

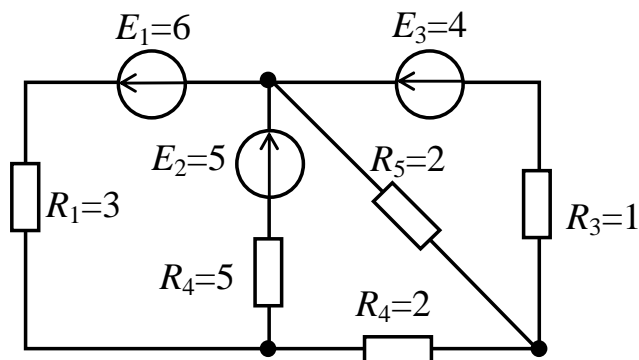


Рис. 2.5

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]).

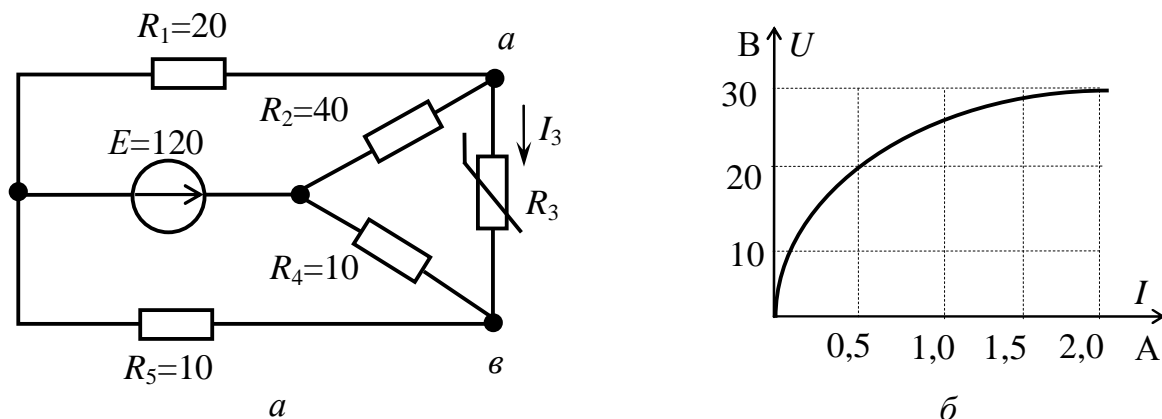


Рис. 2.6

4. Экспериментальная часть

4.1. Описание лабораторного оборудования

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке электрической цепи используется следующее оборудование:

1) 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 ;

2) 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 .

Примечание: при подключении данного источника используются клеммы «плюс» и «земля»;

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

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

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

б) 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.

4.2. Рабочее задание

1. Повторите соответствующие разделы дисциплины [4, 5, 6, 7, 8].

2. В электрической цепи (рис. 2.7) в соответствии с заданными преподавателем параметрами ЭДС рассчитайте токи в ветвях:

а) с помощью законов Кирхгофа;

б) методом междуузлового напряжения.

Диапазон изменения ЭДС: $E_1 = (20 \div 30)$, В; $E_2 = (5 \div 10)$, В.

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

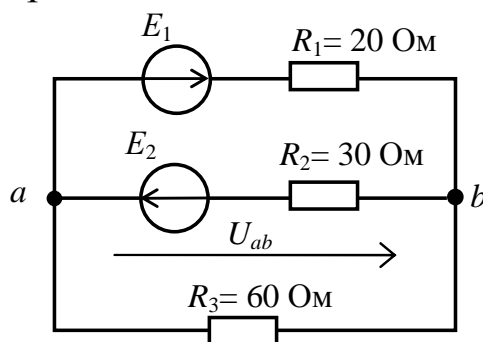


Рис. 2.7

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.

3. Экспериментально проверьте выполнение законов Кирхгофа для цепи с двумя источниками ЭДС.

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

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

6. Проверьте баланс мощностей.

7. Сделайте выводы по проделанной работе, обратив особое внимание на возможное расхождение экспериментально полученных и теоретически рассчитанных токов в ветвях, а также междуузлового напряжения и напряжения холостого хода.

4.3. Методика выполнения задания

1. Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят.

2. Соберите цепь (рис. 2.8).

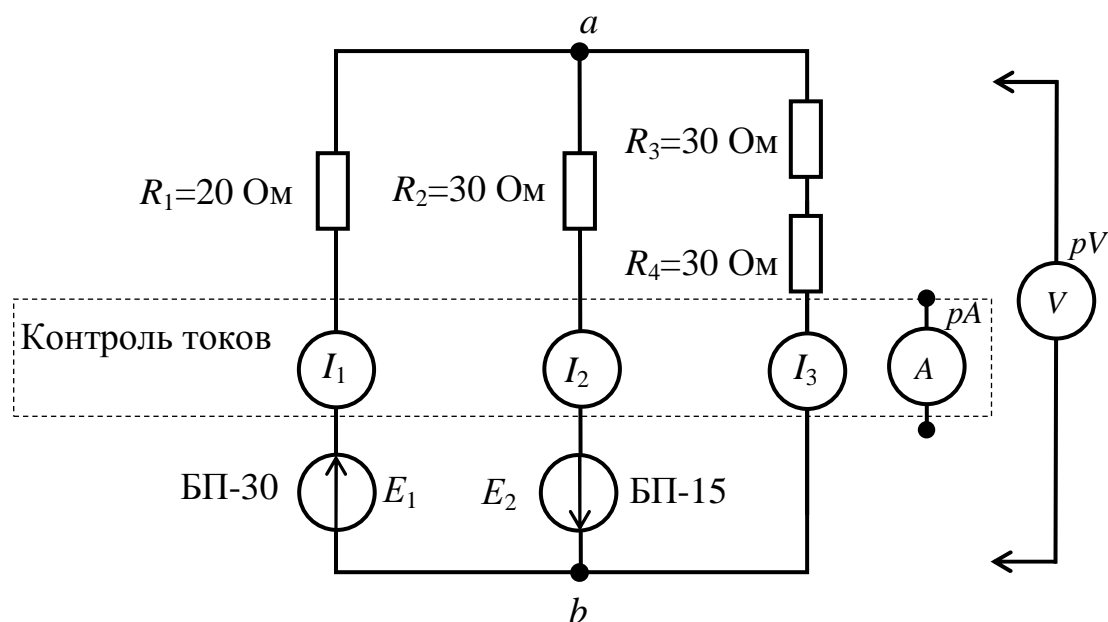


Рис. 2.8

3. Экспериментальная проверка 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	$\sum I_i$	$\sum R_i I_i$	$\sum E_j$

4. Экспериментальное определение токов 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

5. Экспериментальное определение тока I_3 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	$E_3,$ В	$R_3,$ Ом	$I_3,$ А

Методические указания к обработке результатов эксперимента

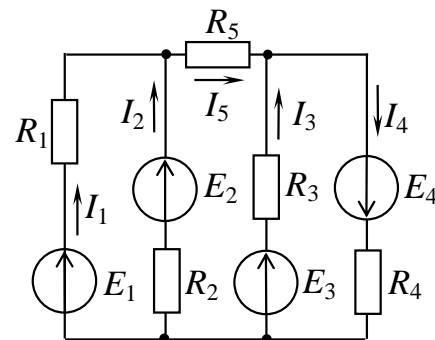
При решении системы уравнений, составленных согласно законам Кирхгофа, рекомендуется воспользоваться любым пакетом прикладных программ для математических расчетов (*MathCAD*, *MathLAB* и др.).

При теоретическом определении междуузлового напряжения U_{ab} рекомендуется воспользоваться выражением (2.1).

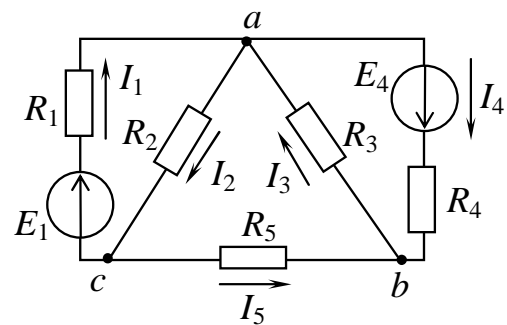
При определении параметров эквивалентного генератора по результатам опытов рекомендуется воспользоваться выражениями (2.2) и (2.3), т.е. определить E_9 и R_9 , а также I_3 из опытов холостого хода и короткого замыкания. Сравните его с током I_3 , полученным путем прямого измерения.

Контрольные вопросы

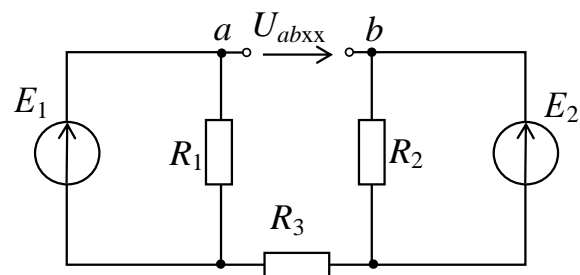
1. Определите ток I_4 , если токи в ветвях составляют $I_1 = 1$ А, $I_2 = 2$ А, $I_3 = 2$ А.



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



3. 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.



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

АНАЛИЗ ОДНОФАЗНЫХ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С RL - И RC -ПРИЕМНИКАМИ

1. Цель и задачи занятия

Цель: изучение аналитических и экспериментальных методов анализа электрических цепей переменного тока.

В результате выполнения заданий студенты должны:

– знать основные фазовые соотношения между токами и напряжениями для цепей с активным, индуктивным и емкостным приемниками, методы расчета простейших цепей переменного синусоидального тока;

– уметь выполнять электрические расчеты в цепях, содержащих активные, индуктивные и емкостные элементы;

– иметь навыки экспериментального определения параметров цепи по показаниям электроизмерительных приборов.

2. Краткие теоретические сведения

2.1. Методы представления 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*

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

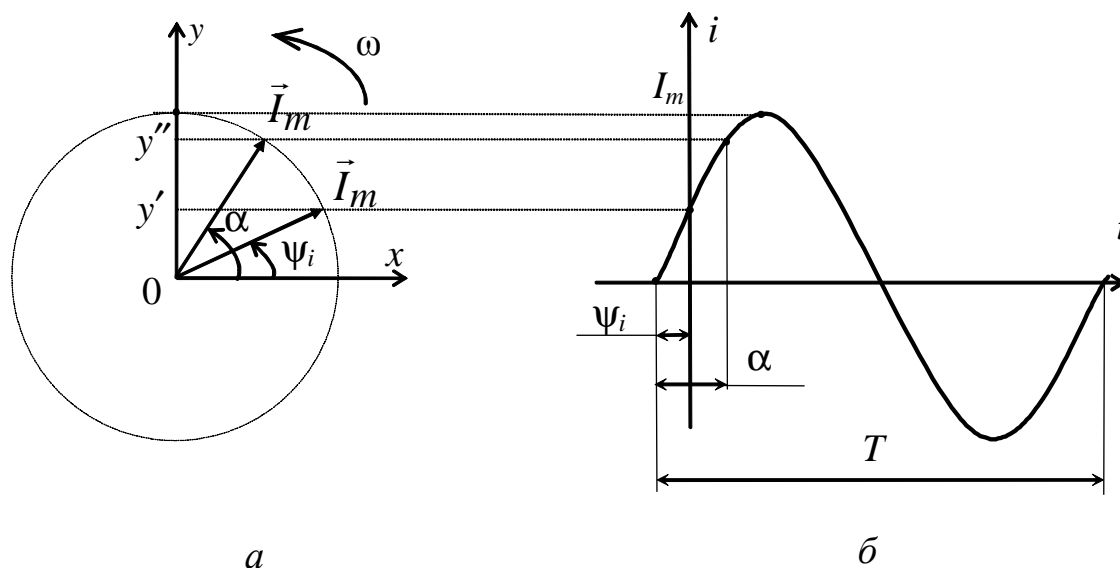


Рис. 3.1

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:

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

Электроизмерительные приборы 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.

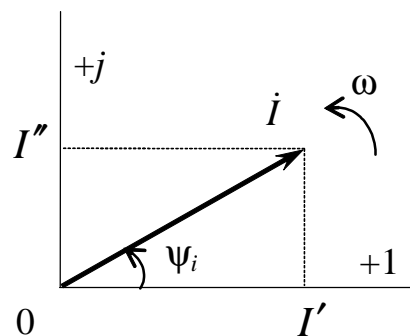


Рис. 3.2

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.

2.2. Последовательное соединение резистора и индуктивной катушки

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

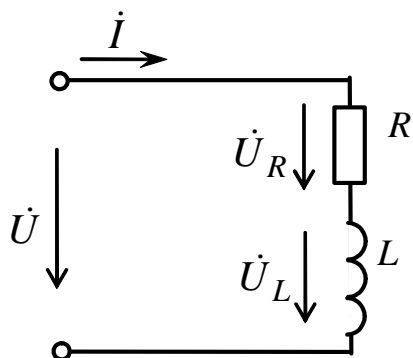


Рис. 3.3

Для *резистивного элемента* начальная фаза напряжения U_R совпадает с начальной фазой тока:

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

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

Для *индуктивного элемента* напряжение \dot{U}_L опережает ток \dot{I} на угол $\varphi = 90^\circ$ из-за возможности катушки накапливать энергию магнитного поля и создавать ЭДС самоиндукции при переменном токе

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

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

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

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

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 её обратно источнику (обратимый процесс):

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

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.

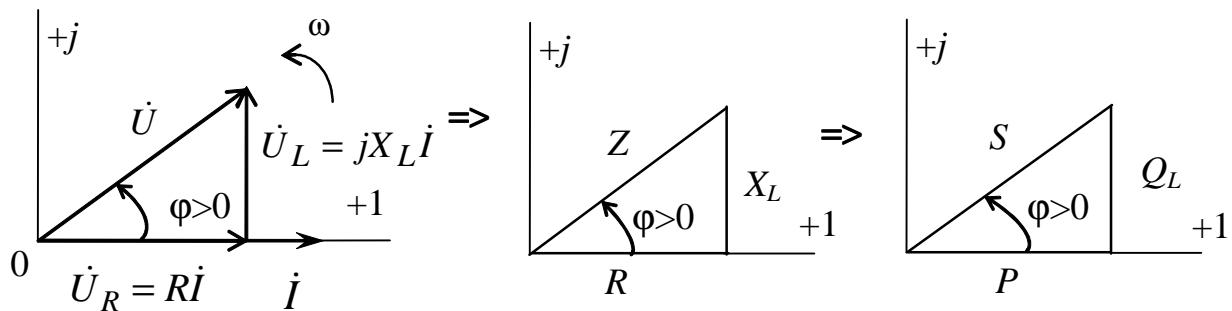


Рис. 3.4

Модуль полной комплексной мощности (S , ВА):

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

2.3. Последовательное соединение резистора и конденсатора

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

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

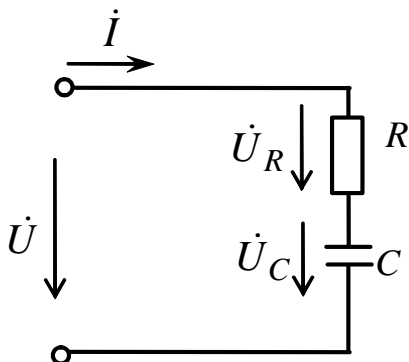


Рис. 3.5

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

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 её 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, φ .

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

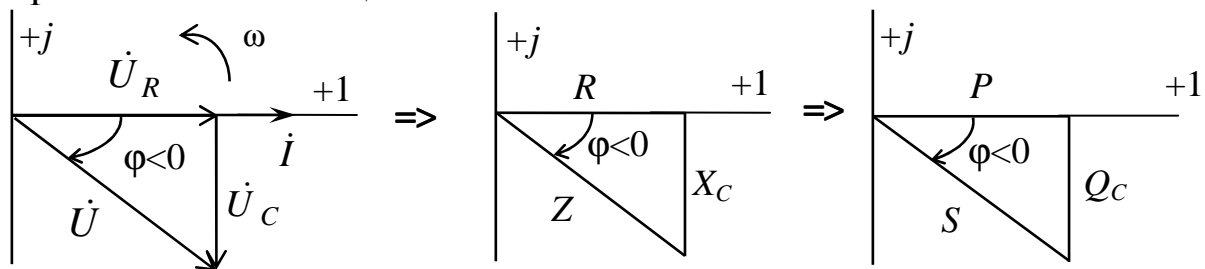


Рис. 3.6

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.

3. Расчетная часть

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 тригонометрической и комплексной формах. Определите полное комплексное сопротивление.

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

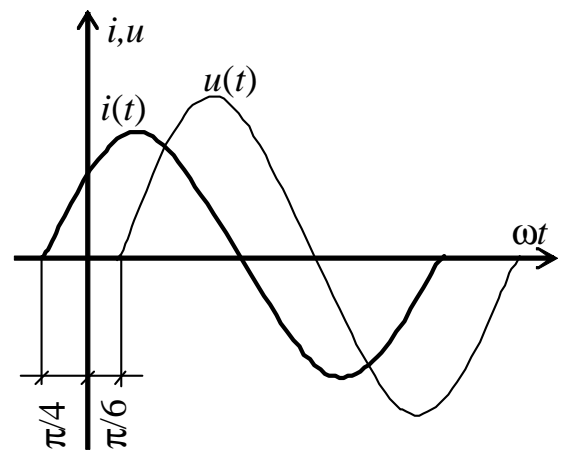


Рис. 3.7

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.

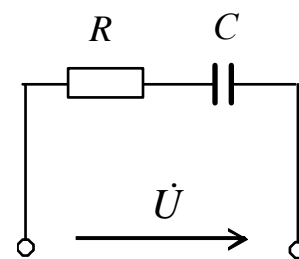


Рис. 3.8

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.

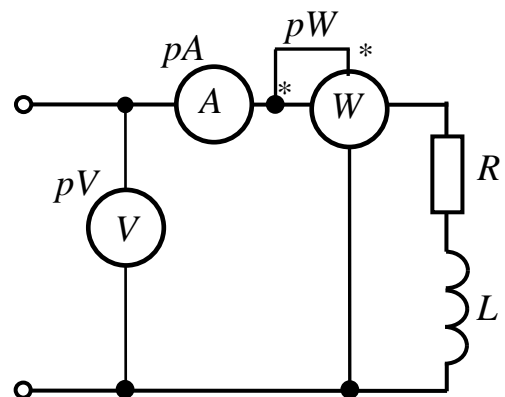


Рис. 3.9

4. Экспериментальная часть

4.1. Описание лабораторного оборудования

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

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

2) индуктивная катушка с переменной индуктивностью $L8$, расположенная в «Блоке индуктивностей»;

3) батарея конденсаторов от 0,5 до 62 мкФ, расположенная в «Блоке конденсаторов»;

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

5) 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.

4.2. Рабочее задание

1. Повторите соответствующие разделы дисциплины [1, 3, 4, 5, 6, 7].

2. Исследуйте электрическую цепь с последовательным соединением резистивного (R) и индуктивного (L) элементов:

– постройте в масштабе семейства треугольников сопротивлений и треугольников мощностей для каждой из групп измерений, запишите в комплексной форме полное сопротивление;

– постройте в масштабе векторную диаграмму тока и напряжений в цепи RL для одного из измерений.

3. Исследуйте электрическую цепь с последовательным соединением резистивного (R) и емкостного (C) элементов:

– постройте в масштабе семейства треугольников сопротивлений и треугольников мощностей для каждой из групп измерений, запишите в комплексной форме полное сопротивление;

– постройте в масштабе векторную диаграмму тока и напряжений в цепи RC для одного из измерений.

4. Сделайте выводы по проделанной работе, обратив внимание на знак угла сдвига фаз между током и напряжением при различном характере цепи, влияние активного и реактивного сопротивлений на полное сопротивление и полную мощность цепи.

4.3. Методика выполнения задания

1. 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 поверните против часовой стрелки до упора.

2. Соберите электрическую цепь (рис. 3.10).

Цепь с последовательным соединением резистивного (R) и индуктивного (L) элементов и цепь с последовательным соединением резистивного (R) и емкостного (C) элементов подключаются к источнику электрической энергии (автотрансформатору) поочередно.

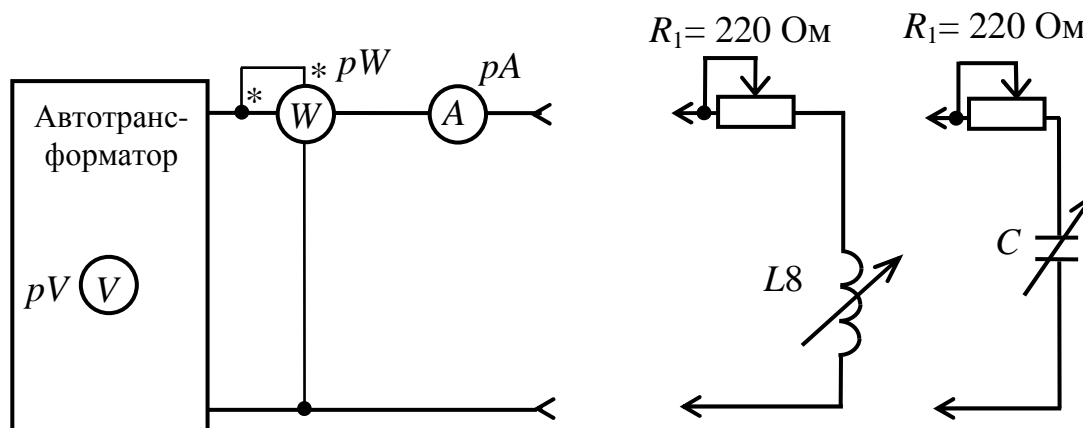


Рис. 3.10

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

4. 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											

5. 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										

Методические указания к обработке результатов эксперимента

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

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

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

Для активно-индуктивной цепи сопротивление $R = R_1 + R_k$ состоит из сопротивления резистора R_i и собственного сопротивления реальной катушки R_k , которое для исследуемой катушки составляет $R_k = 8 \text{ Ом}$.

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

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

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

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

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-индуктивной и активно-емкостной цепи соответственно из выражений (3.5), (3.7) и (3.10).

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

Построение треугольников сопротивлений и треугольников мощностей выполняется в соответствии с выражениями (3.1), (3.2), (3.3), (3.8), (3.9) и рис. 3.4, рис. 3.6.

При построении векторных диаграмм необходимо выполнить расчет напряжений на отдельных элементах в соответствии с выражениями (3.1), (3.2), (3.3), (3.8), (3.9). Векторная диаграмма тока и напряжений должна быть изображена в масштабе с выбором 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.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель и задачи занятия

Цель: исследование режимов работы цепи при последовательном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

В результате выполнения заданий студенты должны:

- знать основы расчета электрических цепей переменного тока, основные фазовые соотношения для неразветвленных цепей, а также основные признаки и условия возникновения резонанса напряжений;
- уметь выполнять простейшие расчеты электрических цепей переменного тока с последовательным соединением элементов;
- иметь навыки сборки электрических цепей, выбора средств и методов электрических измерений в неразветвленных цепях и обработки результатов эксперимента.

2. Краткие теоретические сведения

2.1. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений

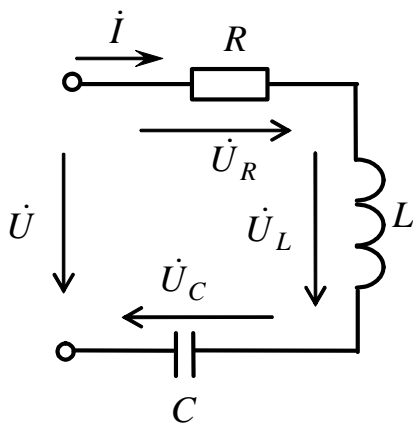


Рис. 4.1

При расчете неразветвленной электрической цепи переменного 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 комплексного числа, Ом,

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

φ – аргумент комплексного числа, 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.

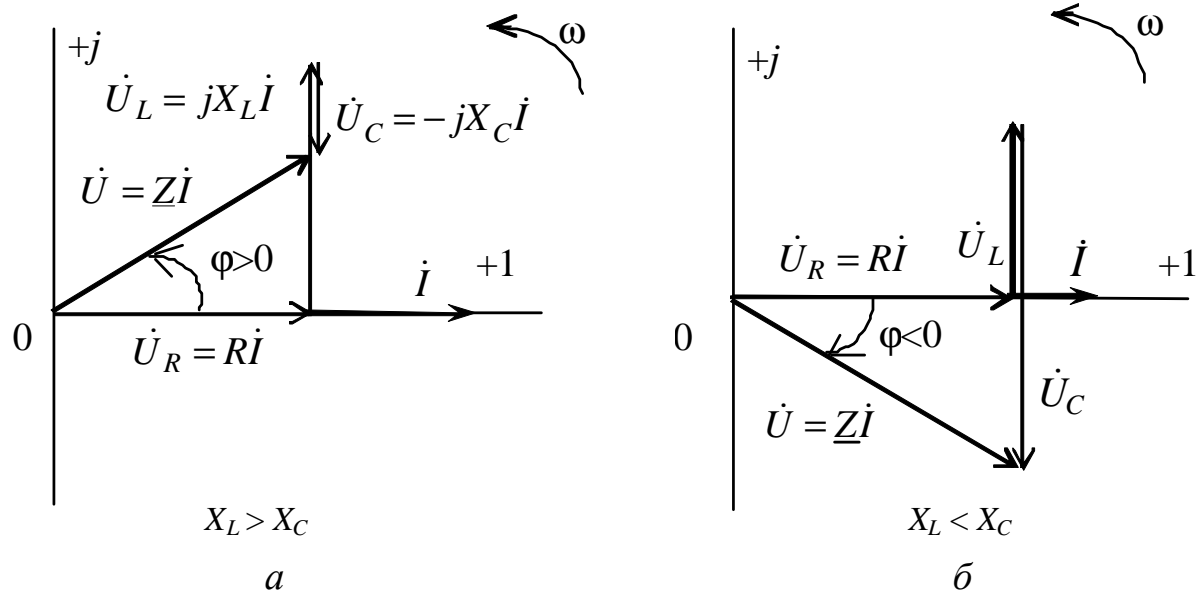


Рис. 4.2

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 полное реактивное сопротивление $X = 0$, а сдвиг фаз $\varphi = 0$. Это явление называется *резонансом напряжений*.

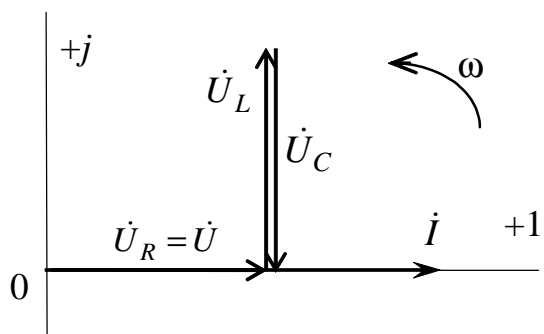


Рис. 4.3

В рассматриваемой цепи (рис. 4.1) резонанс напряжений возможен при равенстве 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.

2.2. 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 .

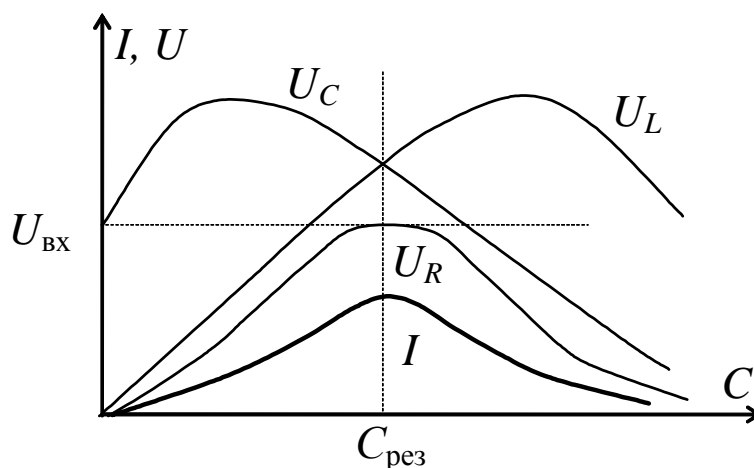


Рис. 4.4

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

3. Расчетная часть

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.

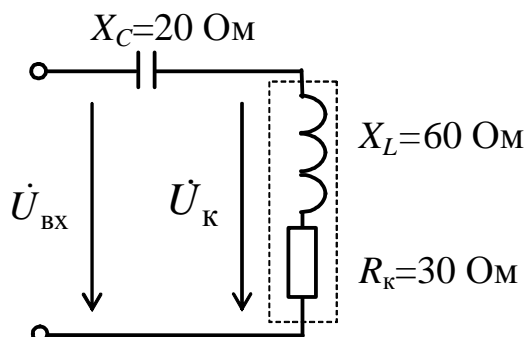


Рис. 4.5

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.

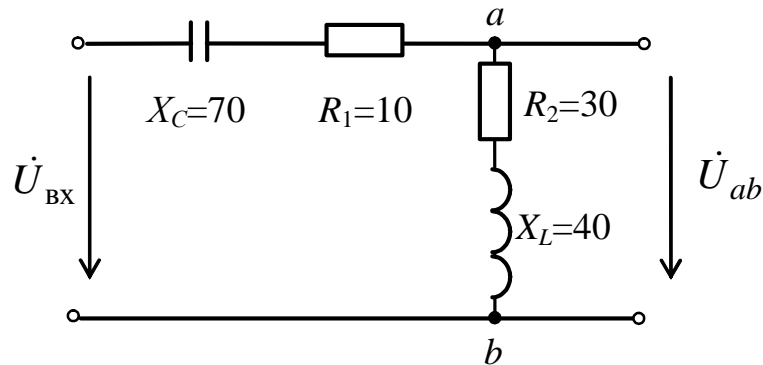


Рис. 4.6

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.

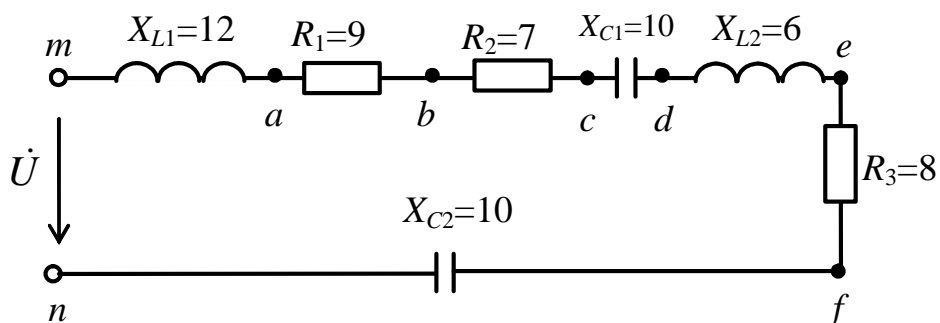


Рис. 4.7

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_0 , а также полную комплексную мощность \underline{S} цепи при резонансе.

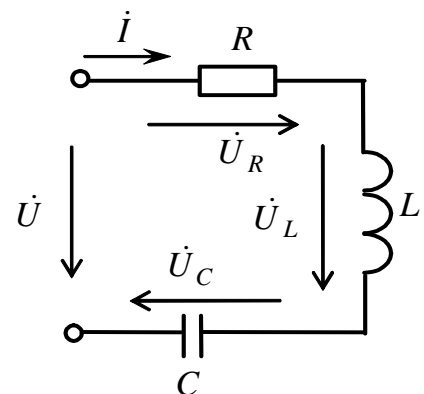


Рис. 4.8

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

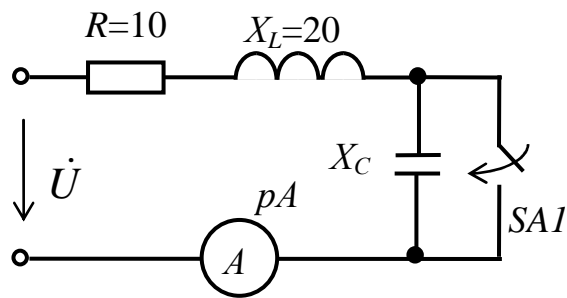


Рис. 4.9

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

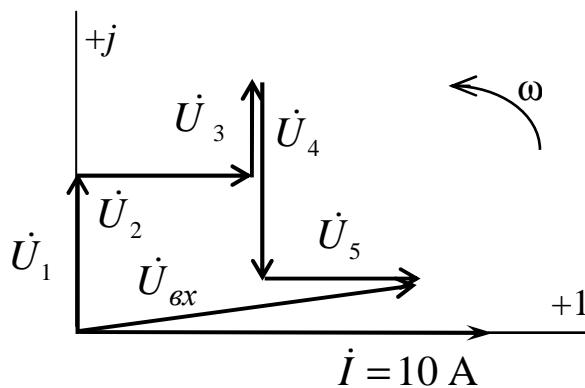


Рис. 4.10

4. Экспериментальная часть

4.1. Описание лабораторного оборудования

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

1) автотрансформатор (АТ), обеспечивающий изменение напряжения в диапазоне (0÷250) В, со встроенным вольтметром, расположенный в «Блоке включения»;

2) индуктивная катушка $L8$ с фиксированной индуктивностью, расположенная в «Блоке индуктивностей», при этом сердечник должен быть полностью разомкнут, для чего необходимо многооборотный регулятор индуктивности повернуть против часовой стрелки до упора;

3) батарея конденсаторов от 0,5 до 62 мкФ, расположенная в «Блоке конденсаторов»;

4) резистор с сопротивлением 20 Ом, расположенный в «Блоке нагрузок», используемый в качестве резистора R_1 исследуемой цепи;

5) 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.

4.2. Рабочее задание

1. Повторите соответствующие разделы дисциплины [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8].

2. Исследуйте электрическую цепь с последовательным соединением резистивного (R), индуктивного (L) и емкостного (C) элементов при различных значениях емкости конденсатора:

– рассчитайте параметры реальной индуктивной катушки из условия резонанса напряжения, полное сопротивление цепи во всех исследуемых режимах, а также потребляемые мощности;

– 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:

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

3. Исследуйте электрическую цепь с последовательным соединением резистивного (R), индуктивного (L) и емкостного (C) элементов при различных значениях индуктивности катушки.

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

4. Сделайте выводы по проделанной работе, обратив внимание на изменение угла сдвига фаз между током и напряжением при различном характере цепи, влияние реактивного сопротивления на величину полного сопротивления, силу тока и мощность цепи; охарактеризуйте резонанс напряжений в неразветвленной цепи.

4.3. Методика выполнения задания

1. 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 поверните против часовой стрелки до упора.

2. Соберите электрическую цепь (рис. 4.11).

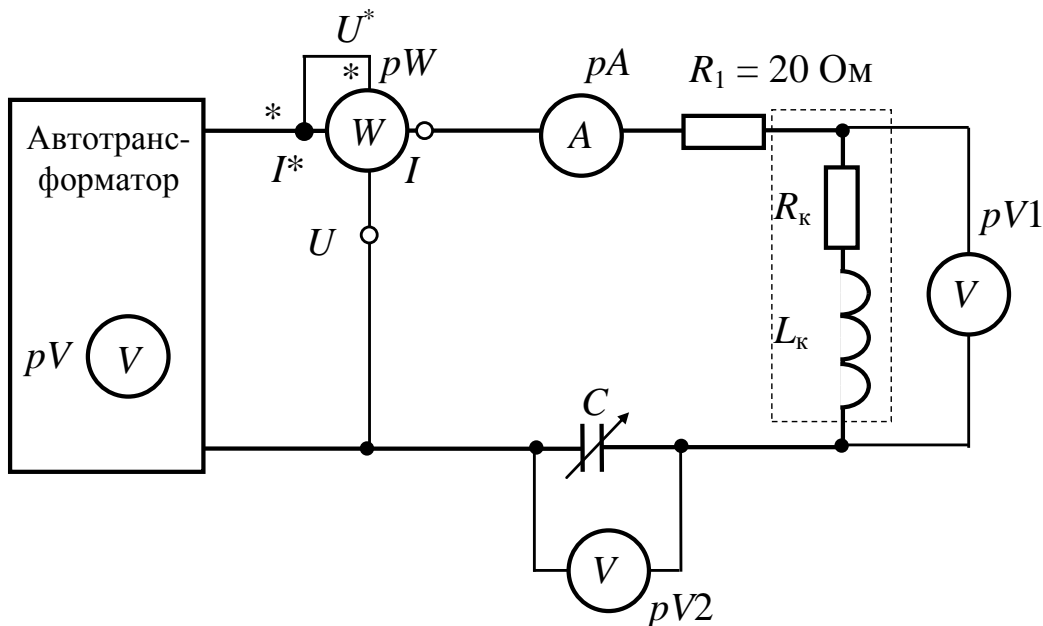


Рис. 4.11

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

4. Исследуйте электрическую цепь с последовательным соединением резистивного (R), индуктивного (L) и емкостного (C) элементов при различных значениях емкости конденсатора.

Экспериментально определите резонансную емкость $C_{рез}$, используя признаки резонанса.

Произведите измерения I , U_R , U_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 $7 \div 9$ измерений).

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

Результаты занесите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

№	Измерено							Вычислено						
	C , мкФ	$U_{\text{вх}}$ В	P Вт	I А	$U_{\text{к}}$ В	$U_{\text{с}}$ В	φ град	$X_{\text{с}}$ Ом	X_{L} Ом	L Гн	R Ом	Z Ом	S ВА	Q вар
1														
.														
.														
7														

5. Исследуйте электрическую цепь с последовательным соединением резистивного (R), индуктивного (L) и емкостного (C) элементов при различных значениях индуктивности катушки.

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

Запишите полученные значения в таблицу, аналогичную табл. 4.1.

Методические указания к обработке результатов эксперимента

При расчете основных параметров цепи следует воспользоваться методом трех приборов – показаниями амперметра pA (I), вольтметра pV ($U_{\text{вх}}$) 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 $\varphi = 0$, $X = X_L - X_C = 0$, то $X_L = X_{\text{срез}}$.

Сопротивление $R = R_1 + R_{\text{к}}$ состоит из сопротивления резистора R_1 и собственного сопротивления реальной катушки $R_{\text{к}}$ и определяется из выражения

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

Полное сопротивление Z определяется согласно закону Ома по показаниям вольтметра и амперметра или из выражений (4.5) и (4.6):

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

Полная мощность S и реактивная мощность Q определяются из выражений:

модуль полной комплексной мощности:

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

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.

Добротность контура определяется в режиме резонанса по выражению (4.8).

Для построения треугольников сопротивлений рекомендуется воспользоваться теоретическими сведениями, приведенными в указаниях к лабораторно-практическому занятию №3.

При построении векторных диаграмм 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, 4.3 и 4.4.

Векторные диаграммы должны быть выполнены в масштабе с выбором масштаба тока и масштаба напряжения.

Контрольные вопросы

1. При каком соотношении индуктивного и емкостного сопротивлений угол сдвига фаз между током и напряжением положительный?

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

3. По каким признакам можно судить о наступлении резонанса напряжений в цепи в процессе эксперимента?

4. Какой физический смысл имеет добротность контура?

5. Как зависят активная P , реактивная Q , полная мощности от параметров резонансного контура?

Лабораторно-практическое занятие № 5
**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА**

1. Цель и задачи занятия

Цель: исследование работы электрической цепи переменного синусоидального тока с параллельным соединением ветвей и повышение коэффициента мощности цепи.

В результате выполнения заданий студенты должны:

- знать основы расчета электрических цепей переменного тока, основные фазовые соотношения для разветвленных цепей, а также основные признаки и условия возникновения резонанса токов;
- уметь выполнять простейшие расчеты электрических цепей переменного тока с параллельным соединением элементов, подбирать емкость конденсатора для компенсации индуктивной мощности.

2. Краткие теоретические сведения

2.1. 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 .

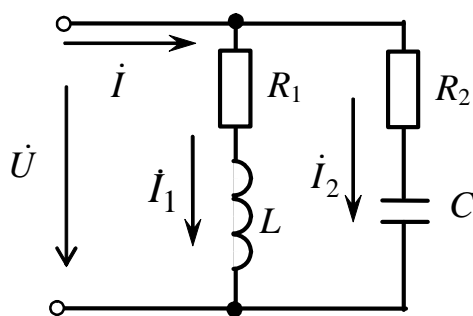


Рис. 5.1

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 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 для случая $B_L < B_C$ имеет вид (рис. 5.2).

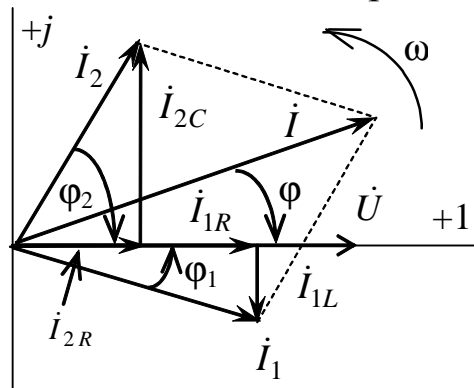


Рис. 5.2

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 стрелки 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;

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

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

2.2. 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.

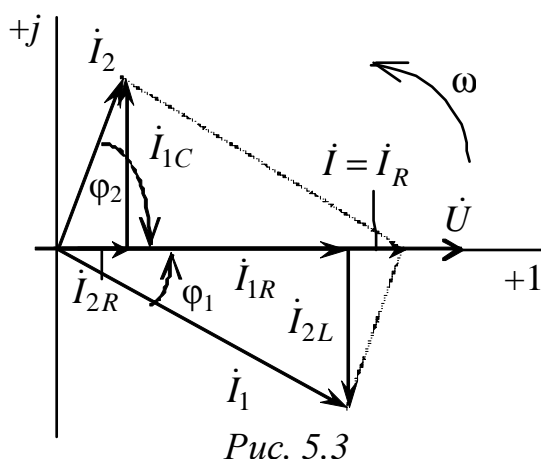
Резонанс на участке электрической цепи при параллельном соединении индуктивного и емкостного элементов называется *резонансом токов*.

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

2.3. 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 потребуются 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 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).

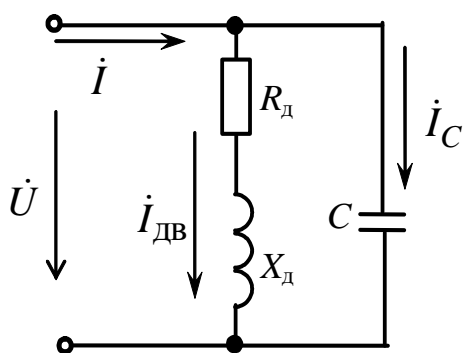


Рис. 5.4

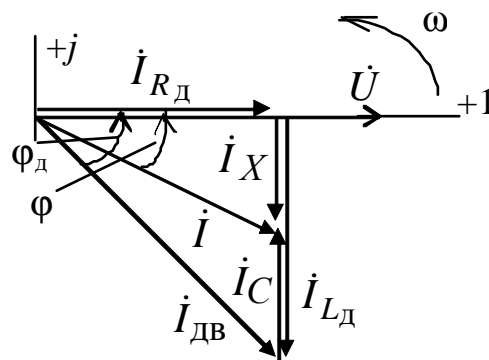


Рис. 5.5

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

$$I_C = I_{L_d} - I_X.$$

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:

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

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 $0,9 \div 0,95$.

3. Расчетная часть

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

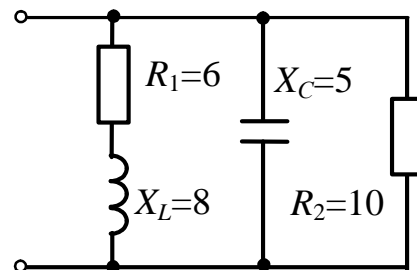


Рис. 5.6

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

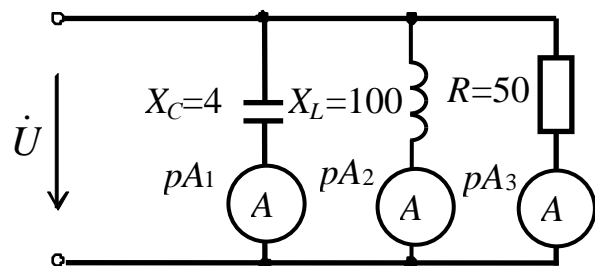


Рис. 5.7

Задача 3. Определите потребляемый ток \dot{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.

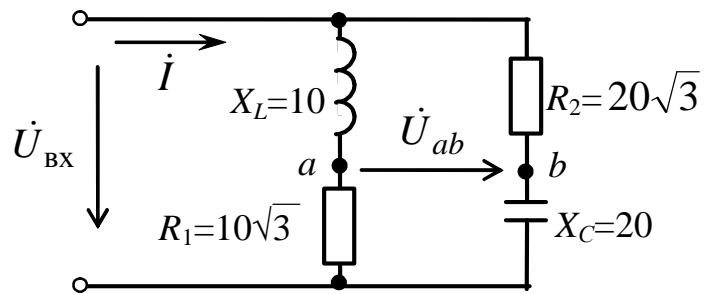


Рис. 5.8

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

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

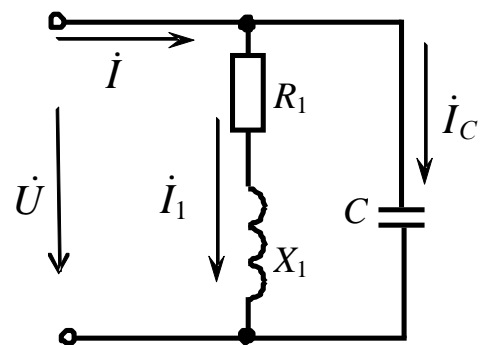


Рис. 5.9

Задача 5. К асинхронному двигателю, полезная мощность которого $P = 3,7$ кВт, КПД $\eta = 83,5$ %, сопротивления проводов $R_{пр} = 2$ Ом, подводится напряжение $U = 380$ В. Двигатель работает с $\cos\phi_{дв} = 0,707$. Какую емкость нужно включить параллельно обмоткам 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).

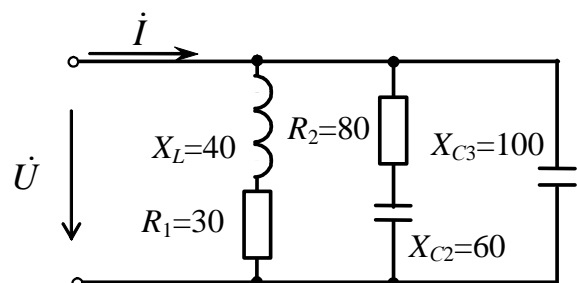


Рис. 5.10

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.

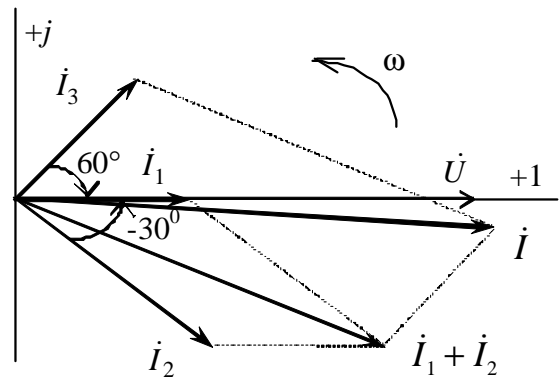


Рис. 5.11

4. Экспериментальная часть

4.1. Описание лабораторного оборудования

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

1) автотрансформатор (АТ), обеспечивающий изменение напряжения в диапазоне (0÷250) В, со встроенным вольтметром, расположенный в «Блоке включения»;

2) индуктивная катушка с постоянной индуктивностью $L8$, расположенная в «Блоке индуктивностей», при этом сердечник должен быть полностью разомкнут, для чего необходимо многооборотный регулятор индуктивности повернуть против часовой стрелки до упора;

3) батарея конденсаторов от 0,5 до 62 мкФ, расположенная в «Блоке конденсаторов»;

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

5) 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.

4.2. Рабочее задание

1. Повторите соответствующие разделы дисциплины [1, 2, 4, 5, 6, 8].

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

– рассчитайте параметры реальной индуктивной катушки;

– определите добротность контура;

– постройте в масштабе графики зависимостей $I=f(C)$; $I_k=f(C)$; $I_C=f(C)$; $Y=f(C)$; $\varphi=f(C)$;

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

3. Выполните повышение коэффициента мощности реальной индуктивной катушки:

– рассчитайте компенсирующую емкость C , которую необходимо включить параллельно катушке, чтобы коэффициент мощности цепи ($\cos\varphi$) составил 0,98;

– экспериментально подтвердите результаты расчета.

4. Сделайте выводы по проделанной работе, обратив внимание на изменение угла сдвига фаз между током и напряжением при различном характере цепи, влияние реактивного сопротивления на полное сопротивление, силу тока и мощность цепи; поясните, чем характеризуется резонанс токов в разветвленной цепи.

4.3. Методика выполнения задания

1. 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 поверните против часовой стрелки до упора.

2. Соберите электрическую цепь (рис. 5.12).

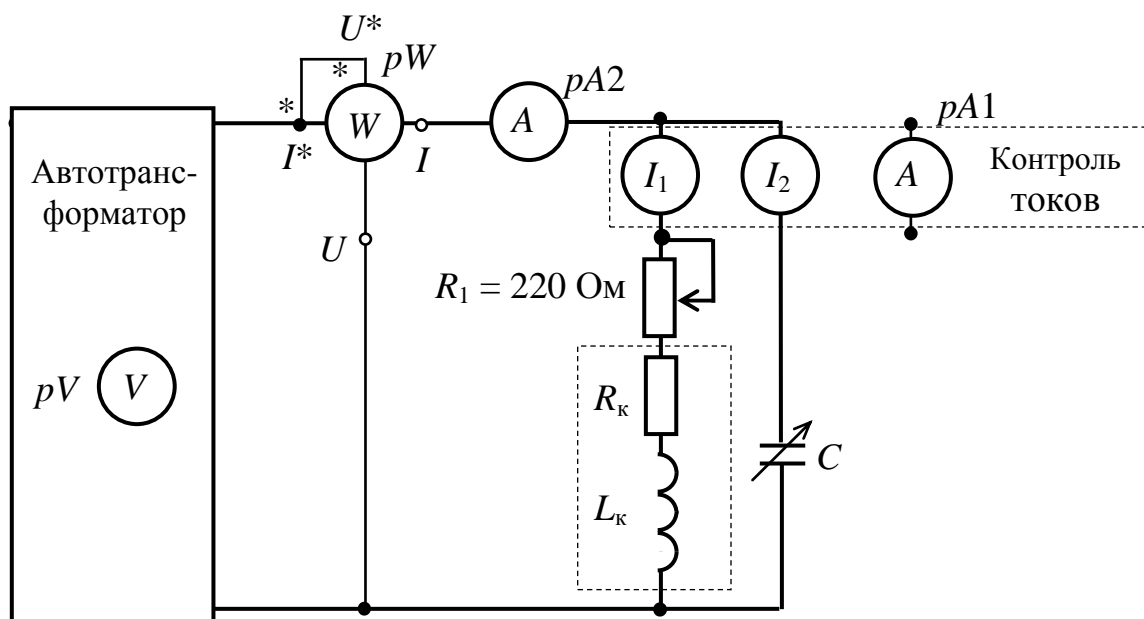


Рис. 5.12

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

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

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

- экспериментально определите резонансную емкость $C_{рез}$, используя основные признаки резонанса (см. пп. 2.2);

- 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.

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 Ом	X_L Ом
1														
⋮														
7														

6. Решите проблему повышения коэффициента мощности реальной индуктивной катушки:

– установите произвольное положение сердечника катушки L_8 , конденсатор отключите, произведите измерения тока, напряжения и мощности, с помощью которых определите параметры катушки R_K и L_K ;

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

Методические указания к обработке результатов эксперимента

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 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:

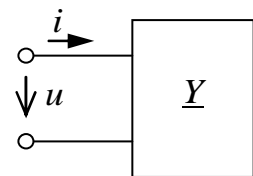
$$Z_1 = \frac{U_{ВХ}}{I_K};$$
$$Z_2 = X_C = \frac{U_{ВХ}}{I_C}.$$

При определении компенсирующей емкости для повышения $\cos\varphi$ цепи до фиксированного значения угла можно воспользоваться формулой (5.5) и рекомендациями пп. 2.3 теоретической части.

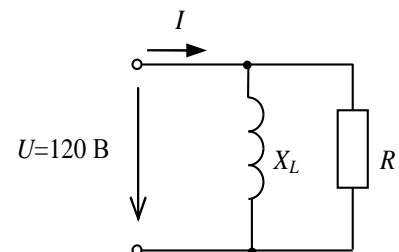
Контрольные вопросы

1. Как определяются активная, индуктивная и емкостная проводимости исследуемой цепи?
2. Что называется активной и реактивной составляющими тока?
3. Какое соотношение определяет сдвиг по фазе между током и напряжением в цепи при параллельном соединении RL и RC -ветвей?
4. С помощью каких приборов и по каким признакам можно судить о возникновении резонанса токов в цепи?
5. Почему принципы резонанса токов используются для компенсации коэффициента мощности ($\cos\phi$) промышленных установок?
6. Начертите треугольники сопротивлений и проводимостей и выведите формулы перехода от сопротивлений к проводимостям и обратно.
7. Напишите условие возникновения в цепи резонанса токов, выраженное через сопротивления параллельных ветвей.

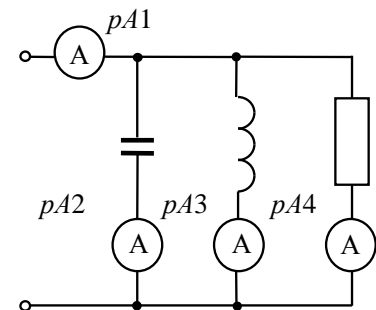
8. Определите действующее значение тока на входе цепи при комплексной проводимости $\underline{Y}=0,05e^{-j\pi/4}$ См пассивного двухполюсника и напряжении $u(t)=141\sin(314t+\pi/4)$ В.



9. Определите действующее значение тока I , протекающего на входе цепи, если $R = 30$ Ом и $X_L = 40$ Ом.



10. Определите показание амперметра $pA1$, если известны показания приборов $pA2 \Rightarrow 4$ А, $pA3 \Rightarrow 8$ А, $pA4 \Rightarrow 3$ А.



ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ЗВЕЗДОЙ

1. Цель и задачи занятия

Цель: исследование трехфазной электрической цепи при различных режимах включения приемников, соединенных звездой, приобретение навыков построения векторных диаграмм токов и напряжений.

В результате выполнения заданий студенты должны:

- знать методы расчета трехфазных цепей, особенности работы трехфазных цепей при соединении нагрузки звездой с нейтральным проводом и без нейтрального провода;
- уметь выполнять расчеты и строить векторные диаграммы токов и напряжений для трехфазных цепей при соединении нагрузки звездой;
- иметь навыки проведения экспериментов с электротехническими устройствами в трехфазных цепях.

2. Краткие теоретические сведения

Под *трехфазной системой* понимается совокупность электрических цепей, в которых действуют 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 две цепи соединения звездой трехфазного потребителя:

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

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

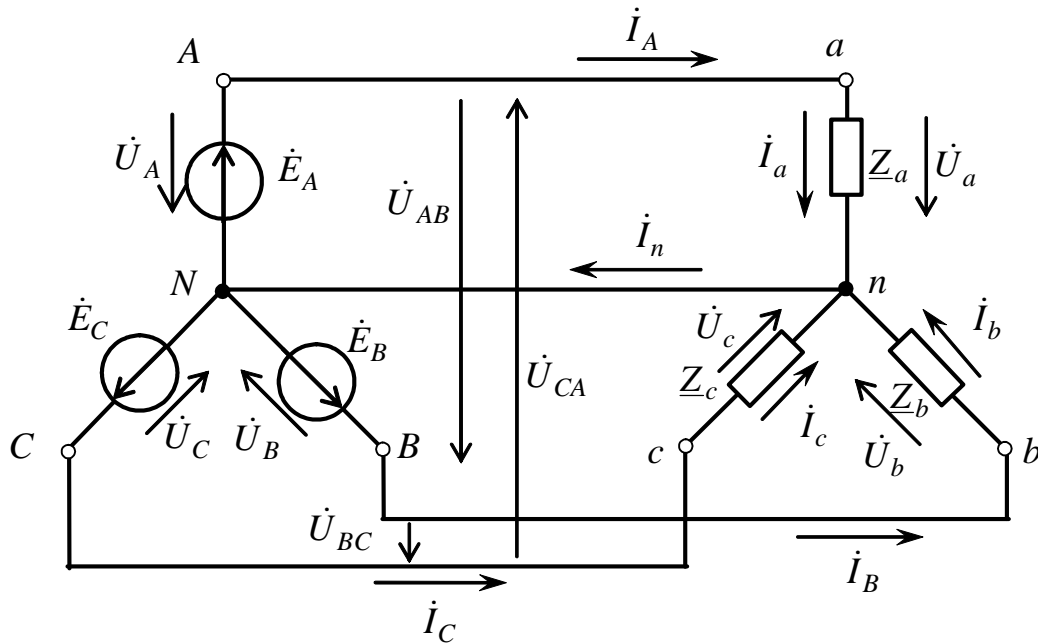


Рис. 6.1

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

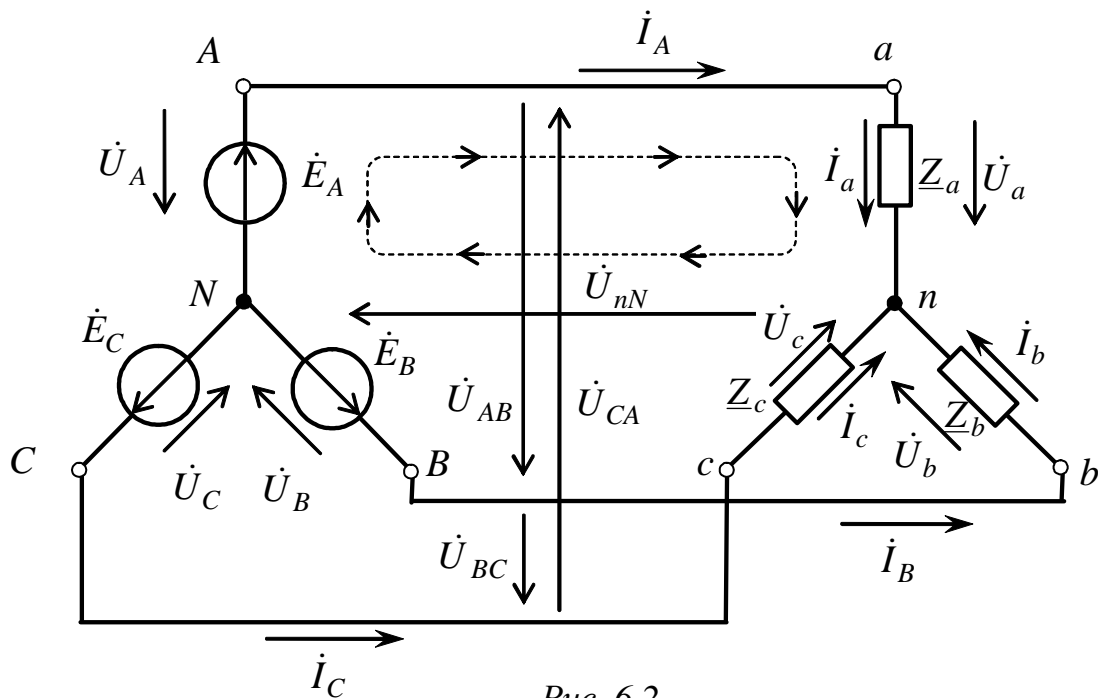


Рис. 6.2

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:

$$I_\phi = I_\Delta. \quad (6.1)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C; \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned}$$

Аналогично записываются соотношения для линейных и фазных напряжений приемника:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_a - \dot{U}_b; \\ \dot{U}_{bc} &= \dot{U}_b - \dot{U}_c; \\ \dot{U}_{ca} &= \dot{U}_c - \dot{U}_a. \end{aligned}$$

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_Δ напряжениями источника существует соотношение

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

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. Сеть имеет нулевой защитный провод (PE) для обеспечения безопасной работы оборудования.

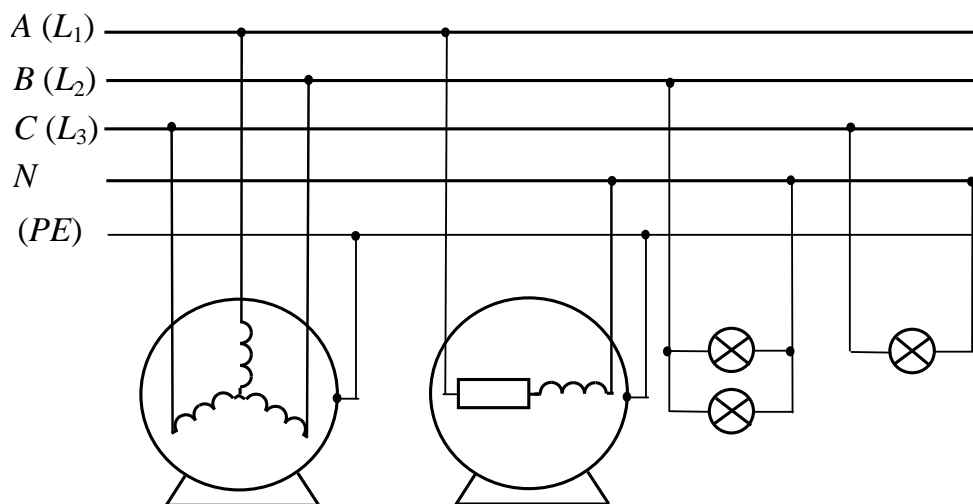


Рис. 6.3

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

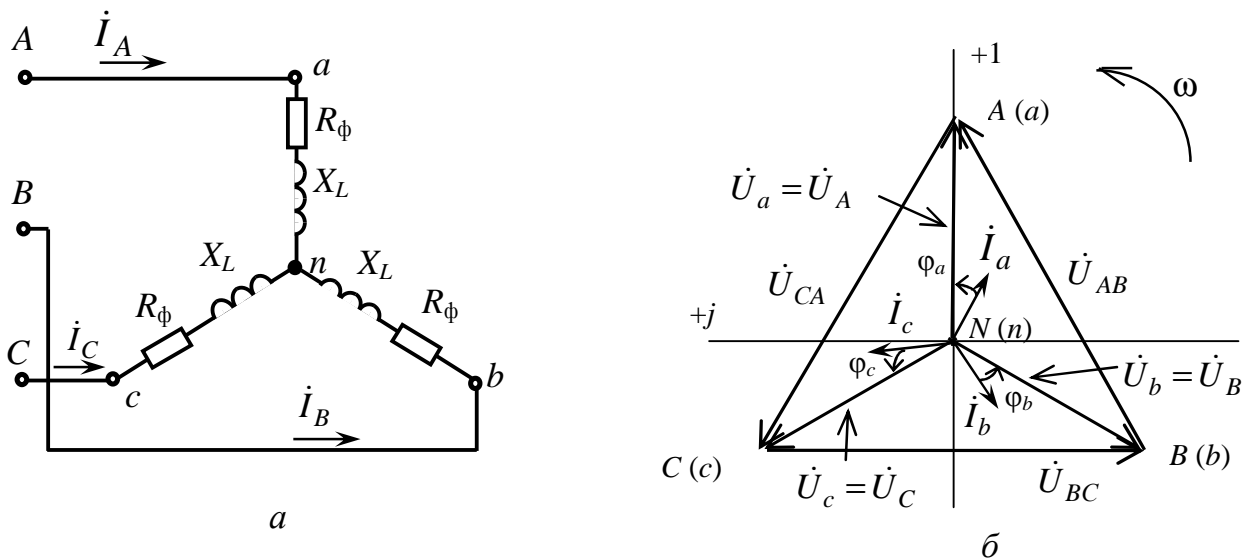


Рис. 6.4

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

$$\dot{I}_a \neq \dot{I}_b \neq \dot{I}_c,$$

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

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

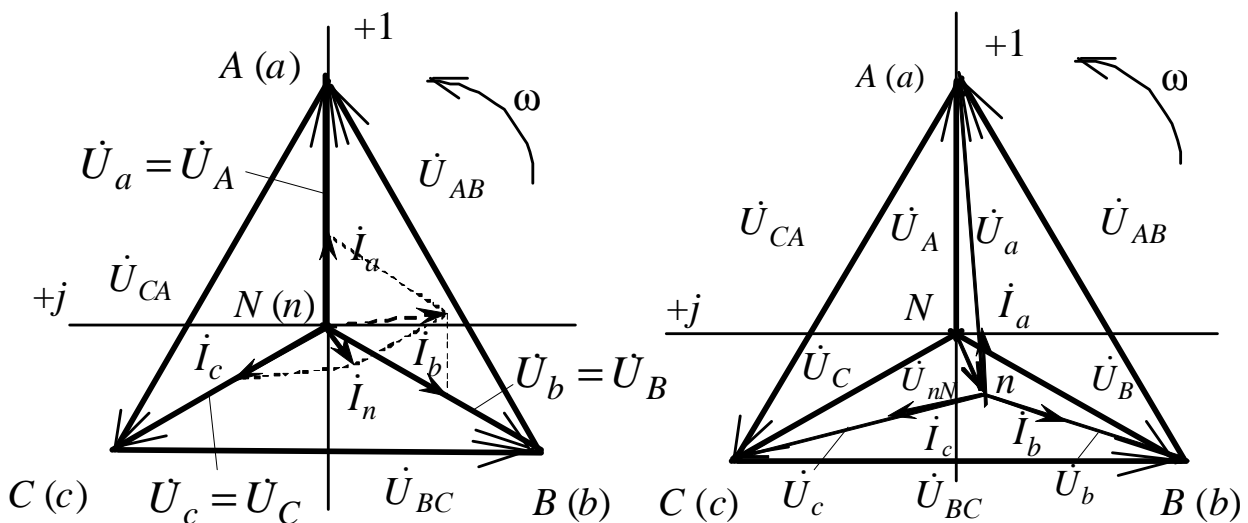


Рис. 6.5

Рис. 6.6

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.

Важной особенностью соединения приемника 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 появится 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:

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

где $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$ – соответственно, комплексы проводимостей фаз приемника, См.

3. Расчетная часть

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

Определите токи в фазах. 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 токов и напряжений.

4. Экспериментальная часть

4.1. Описание лабораторного оборудования

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

- три ламповых реостата, расположенные в «Блоке нагрузок»;
- индуктивные катушки $L6$, $L7$, $L8$ с параметрами ($L = 0,6 \text{ Гн}$, $R = 8 \text{ Ом}$), расположенные в «Блоке индуктивностей»;
- батарея конденсаторов $0 \div 62,5 \text{ мкФ}$, расположенная 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.

4.2. Рабочее задание

1. Повторите соответствующие разделы дисциплины [1, 2, 3, 4, 6, 7, 9].

2. Определите соотношение между линейными и фазными напряжениями в трехфазной цепи по схеме «звезда» по результатам измерения напряжений источника.

3. Исследуйте трехфазную электрическую цепь, собранную по схеме «звезда без нейтрального провода» в рабочих режимах симметричной и несимметричной нагрузки, а также в аварийных режимах – разрыв и короткое замыкание одной из фаз:

– определите соотношения между фазными напряжениями источника и приемника;

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

4. Исследуйте трехфазную электрическую цепь, собранную по схеме «звезда с нейтральным проводом» в рабочих режимах симметричной и несимметричной нагрузки, а также в аварийном режиме разрыва одной из фаз:

– определите соотношения между фазными напряжениями источника и приемника;

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

5. Сделайте выводы по проделанной работе, обратив внимание на влияние нейтрального провода на величины напряжений и токов в фазах при различных нагрузках.

4.3. Методика выполнения задания

1. Перед началом сборки цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят.

2. Включите тумблеры питания блоков приборов и коммутации.

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

Таблица 6.1

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

4. Соберите электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 6.7, для исследования трехфазной цепи без нейтрального провода при активной нагрузке, используя ламповые реостаты.

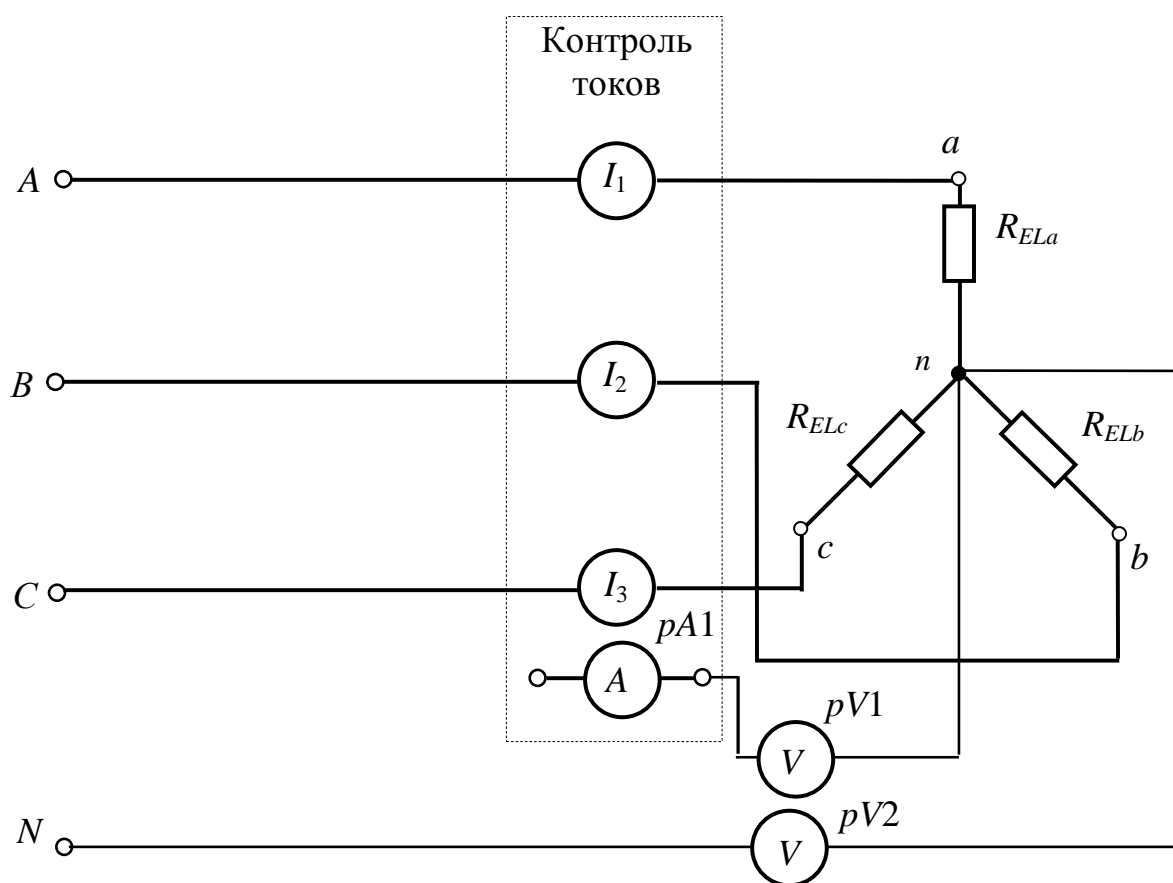


Рис. 6.7

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

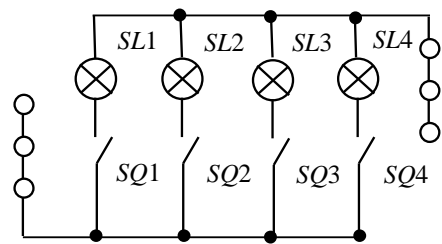


Рис. 6.8

В качестве активно-индуктивной нагрузки ($R-L$) при симметричном режиме в фазы последовательно с ламповыми реостатами включите индуктивные катушки $L6$, $L7$, $L8$, при этом многооборотный сердечник индуктивной катушки $L8$ должен быть полностью введен (регулятор повернуть по часовой стрелке до упора).

В качестве активно-индуктивной нагрузки ($R-L$) при несимметричном режиме рекомендуется использовать индуктивную катушку $L6$ 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 $8 \div 15$ мкФ.

Вариант изменения нагрузки при различных режимах работы цепи задается 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
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 » $R-L$

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							

5. Соберите электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 6.9, для исследования трехфазной системы с нейтральным проводом.

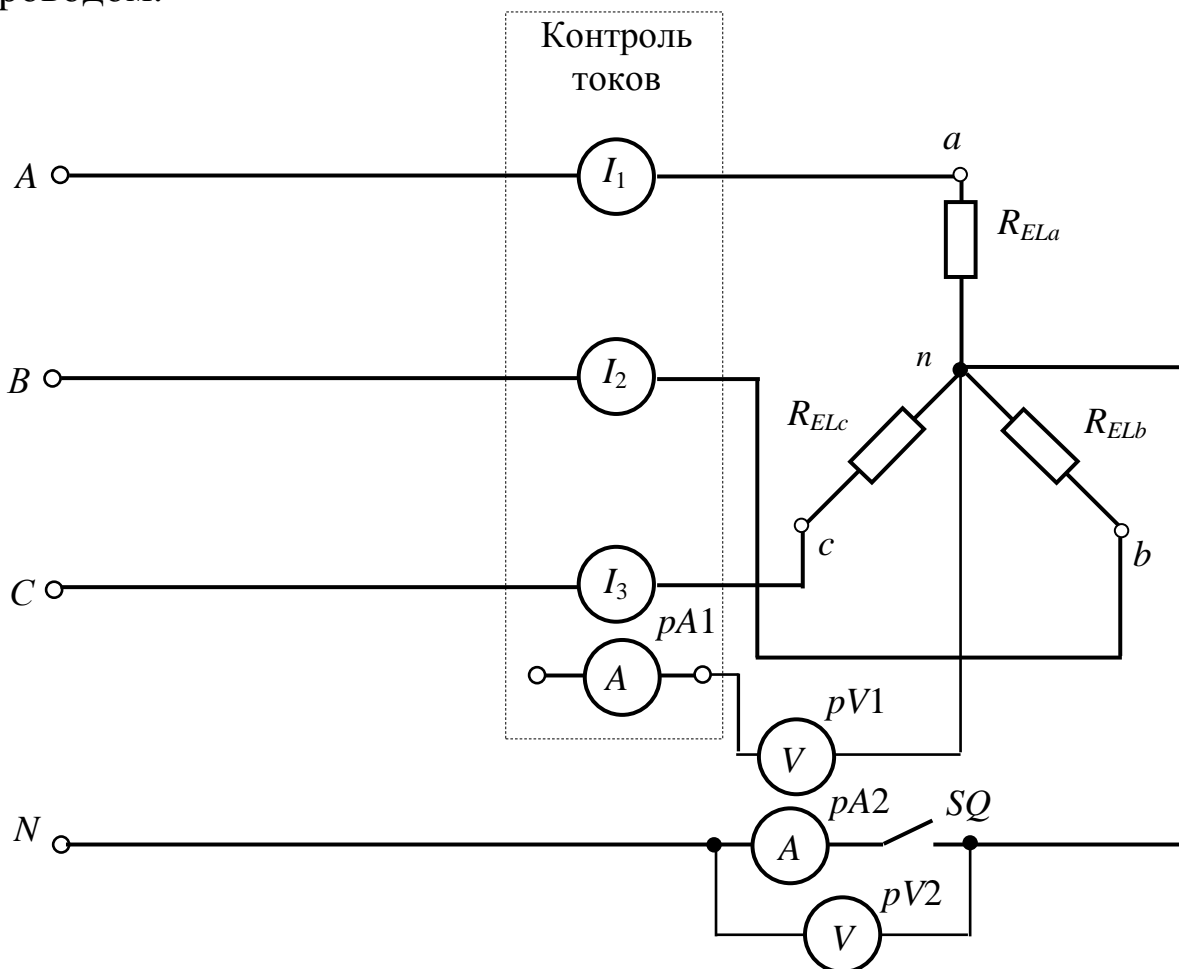


Рис. 6.9

Вариант изменения нагрузки при различных режимах работы цепи задается преподавателем в соответствии с табл. 6.2.

Данные измерений занесите в табл. 6.4.

Таблица 6.4

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								

Методические указания к обработке результатов эксперимента

Соотношение между линейными и фазными напряжениями необходимо определить по результатам табл. 6.1 и сравнить с выражением (6.2).

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 $Z_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}}$;

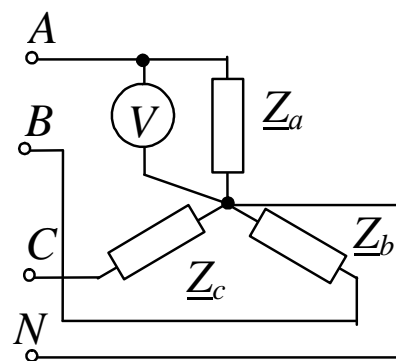
– активное сопротивление фазы $R_{\phi} = \sqrt{Z_{\phi}^2 - X_{\phi}^2}$.

При активно-индуктивной нагрузке в фазах следует учитывать, что активное сопротивление фазы состоит из сопротивления ламп и активного сопротивления индуктивной катушки $R_{\phi} = R_{л} + R_{к}$.

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 топографическую векторную диаграмму напряжений и покажите на ней векторы токов.

5. Изобразите топографическую векторную диаграмму напряжений и покажите на ней векторы 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 .

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

1. Цель и задачи занятия

Цель: теоретическое и экспериментальное изучение работы трехфазной цепи при соединении приемников треугольником в симметричном и несимметричном режимах; приобретение навыков построения векторных диаграмм токов и напряжений.

В результате выполнения заданий студенты должны:

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

2. Краткие теоретические сведения

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 одной фазы соединяется с началом другой фазы.

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:

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

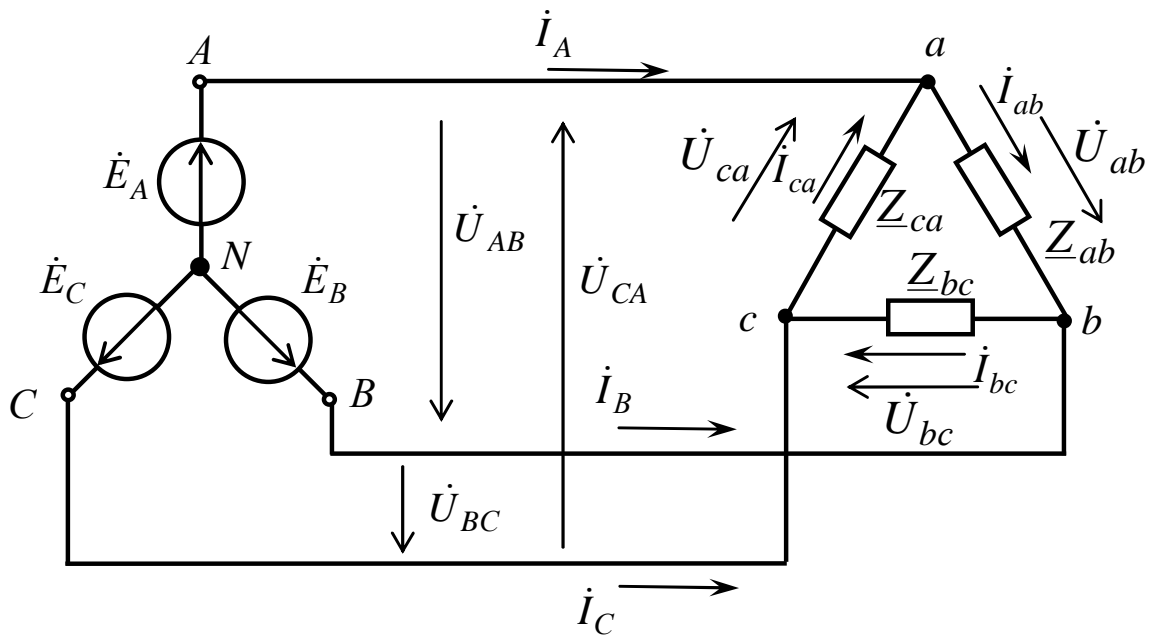


Рис. 7.1

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 токов и напряжений имеет вид (рис. 7.2, б).

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

$$I_{л} = \sqrt{3}I_{ф}.$$

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

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

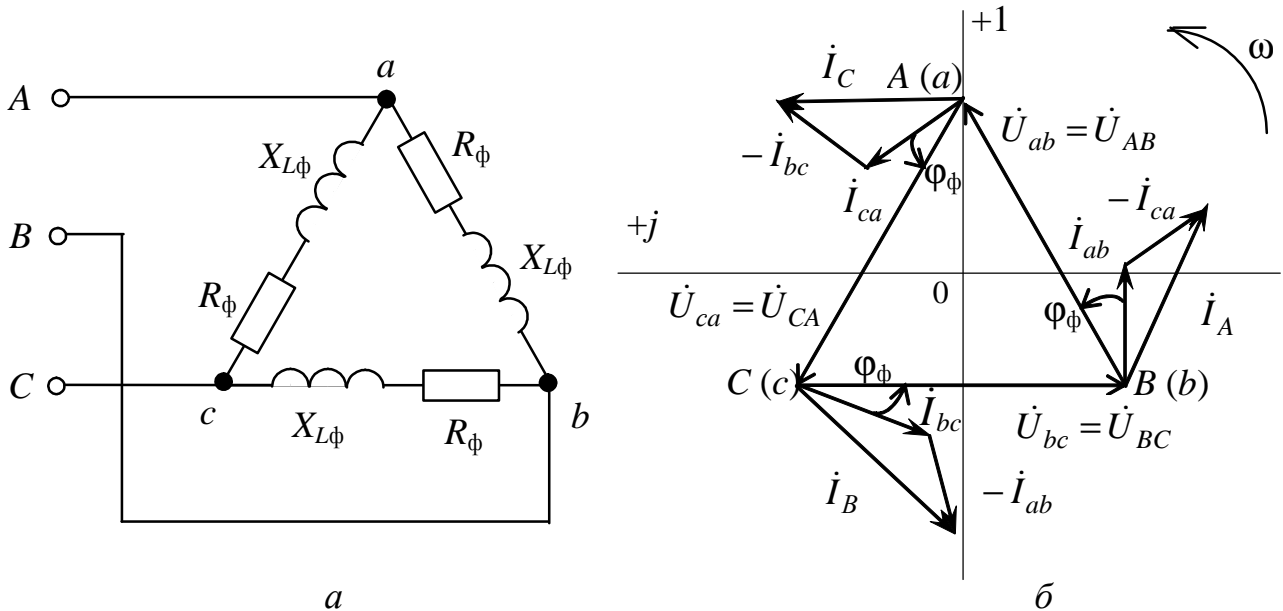


Рис. 7.2

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:

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

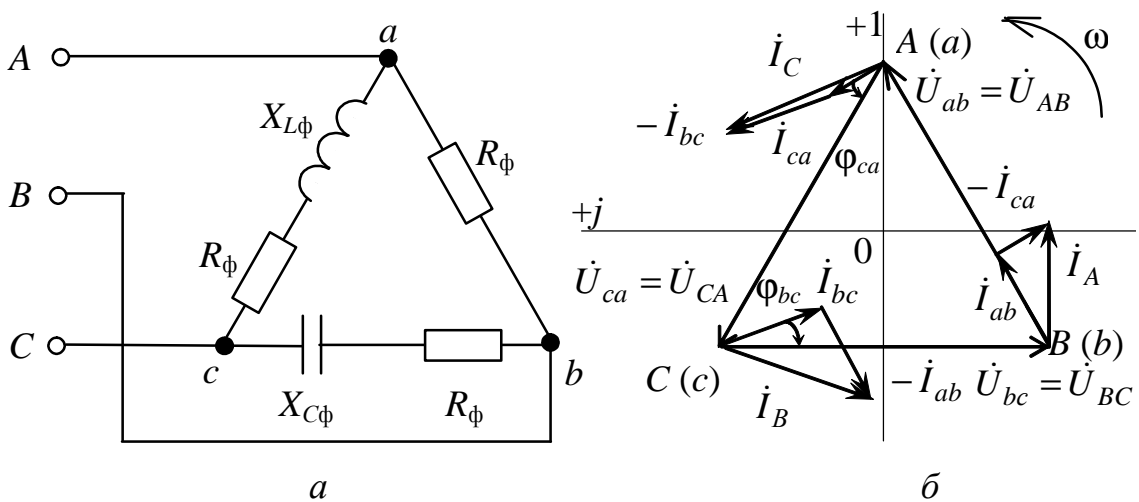


Рис. 7.3

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 не меняются (будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах линий, соединенных с этой фазой). Например, для схемы (рис. 7.4) векторная диаграмма токов и напряжений имеет вид (рис. 7.5).

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

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

3. Расчетная часть

Задача 1. К трехфазной сети с линейным 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 токов и напряжений. Рассмотрите аварийные режимы: обрыв фазного провода и обрыв линейного провода.

Задача 2. В трехфазную сеть с линейным 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 сопротивление, 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 токов и напряжений.

Задача 4. К трехфазной сети 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).

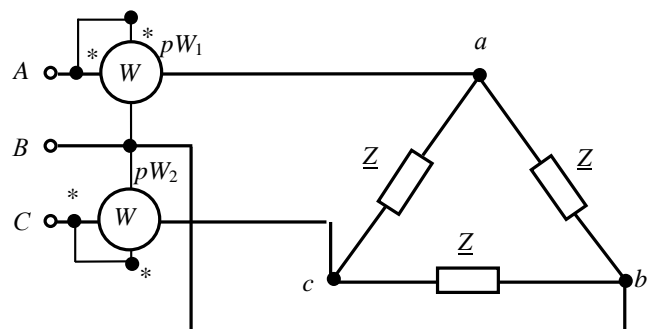


Рис. 7.4

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 «с». Вычислите фазные и линейные токи, полагая сопротивления ламп неизменными.

4. Экспериментальная часть

4.1. Описание лабораторного оборудования

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

- три ламповых реостата, расположенные в «Блоке нагрузок»;
- индуктивная катушка L_6 с параметрами ($L = 0,6$ Гн, $R = 8$ Ом), расположенная в «Блоке индуктивностей»;

- 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, включается в блок «Контроль токов (I_1, I_2, I_3)»;

- б) $pA2$ – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А, включается 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.

4.2. Рабочее задание

1. Повторите соответствующие разделы дисциплины [1, 2, 3, 6].

2. Исследуйте трехфазную электрическую цепь, собранную по схеме треугольник в рабочих режимах симметричной и несимметричной нагрузки, а также в аварийных режимах – обрыв фазного провода и обрыв линейного провода:

- определите соотношение между линейными и фазными токами в трехфазной цепи по схеме треугольник при симметричном режиме работы по результатам измерений;

- постройте в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений для всех режимов исследуемой цепи;

– по векторным диаграммам проверьте выполнение условия (7.4).

3. Рассчитайте потребляемые активную, реактивную и полную мощности при симметричной и несимметричной нагрузках.

4. Сделайте выводы по проделанной работе, обратив внимание на соотношения напряжений и токов в фазах.

4.3. Методика выполнения задания

1. Перед началом сборки цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят.

2. Включите тумблеры блоков питания приборов и коммутации.

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

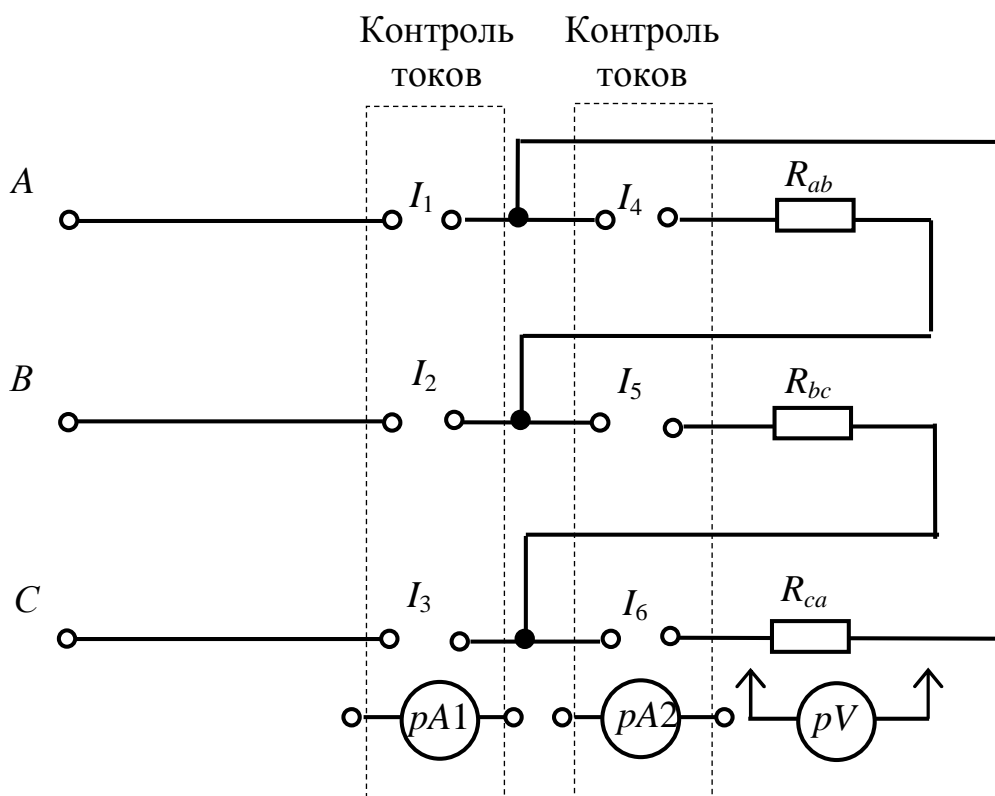


Рис. 7.5

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

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

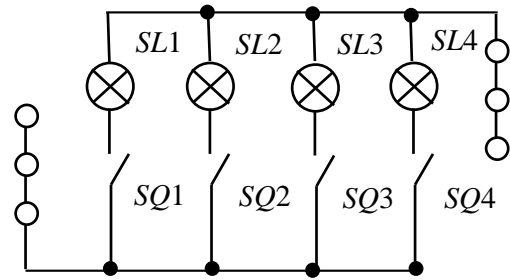


Рис. 7.6

Вариант изменения нагрузки при различных режимах работы цепи задается преподавателем в соответствии с табл. 7.1.

Таблица 7.1

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

В качестве активно-индуктивной нагрузки (*R-L*) при несимметричном режиме рекомендуется использовать индуктивную катушку *L6* 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.

4. Исследуйте режимы работы трехфазной цепи, указанные в табл. 7.1.

Вольтметр в процессе проведения измерений необходимо подключать к соответствующему участку электрической цепи.

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									

5. Вычислите мощности трехфазной цепи.

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									

Методические указания к обработке результатов эксперимента

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

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 $R_{\phi} = \sqrt{Z_{\phi}^2 - X_{\phi}^2}$.

При активно-индуктивной нагрузке в фазах следует учитывать, что активное сопротивление фазы состоит из сопротивления ламп и активного сопротивления индуктивной катушки $R_{\phi} = R_{л} + R_{к}$.

При определении активной, реактивной и полной мощностей рекомендуется воспользоваться выражениями (7.5) – (7.10).

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.

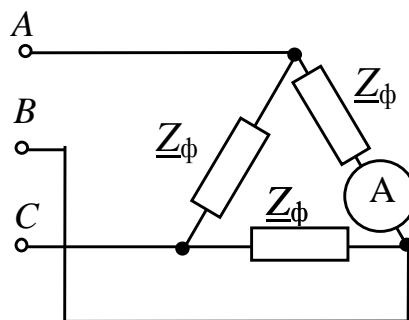
5. Как изменится активная потребляемая мощность симметричного приемника, соединенного треугольником, при обрыве одной из фаз?

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

$$\underline{Z}_{\phi} = 80 - j60 \text{ Ом.}$$



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, 2007. – 336с.

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/>>.