

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

ФГОУ ВПО Брянская государственная сельскохозяйственная академия

Н.М. Прыгов, О.Е.Широбокова, Л.М. Маркарянц, Д.В. Кирдищев

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

**Методические указания и задания
для выполнения курсовых работ студентами – бакалаврами
направления «Электроэнергетика и электротехника»**

Брянск 2013

УДК 621.3.

Прыгов Н.М. Широбокова О.Е. Теоретические основы электротехники. Методические указания и задания для курсовых работ студентам бакалаврами направление «Электроэнергетика и электротехника». - Брянск: издательство Брянской ГСХА, 2014 – 45 с.

Разработали: Прыгов Н.М., канд. техн. наук, доц.
Широбокова О.Е., к.т.н., доц.

Рецензент: Комаров И.Н., докт. техн. наук, профессор

Рекомендовано кафедрой «Систем энергообеспечения»
_____ (Протокол № ____)

Предисловие

Одним из основных видов занятий по курсу “Теоретические основы электротехники” является выполнение курсовой работы. Предлагаемые в пособии задания охватывают весь основной материал курса и соответствуют программе. При изучении курса студенты приобретают необходимые знания об основных методах расчета и физических процессах, с которыми приходится встречаться в теории электрических цепей, машин и электронике.

Целью курсовых работ является окончательная проверка усвоения студентами соответствующих разделов курса.

1. Методические указания к изучению курса и выполнению курсовых работ

Материал, изучаемый студентом по учебнику, необходимо конспектировать в тетради, выделяя основные определения и формулы. Электрические схемы вычерчиваются в условных обозначениях, соответствующих действующим ГОСТам.

После проработки какой-либо темы необходимо без помощи учебника выполнить доказательства законов и вывести формулы. Нельзя оставлять ничего непонятным при изучении дисциплин.

Особое внимание должно быть уделено задачам и вопросам для самопроверки, а также разбору решений типовых примеров, помещенных в учебниках и настоящем пособии.

Приступать к выполнению очередной контрольной работы следует после изучения необходимого материала и решения достаточного количества задач из рекомендуемой литературы.

При оформлении каждой задачи следует приводить исходную схему с принятыми буквенными обозначениями и числами заданных значений. Рисунки, схемы и графики должны быть выполнены аккуратно в масштабе единиц измерения физической величины. Графики следует чертить на миллиметровой бумаге с помощью чертежных инструментов. На осях координат должны быть указаны откладываемые значения и единицы их измерений.

При оформлении курсовой работы нужно указывать необходимые расчетные формулы. Конечный результат должен быть выделен из общего текста.

Решение задач не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований. Каждый этап решения задачи должен иметь пояснение. Вычисления следует выполнять с помощью микрокалькулятора с точностью до третьей значащей цифры.

Курсовые работы выполняются на отдельных листах белой бумаги формата А4, оставляя поля: справа - 10 мм, сверху - 20 мм, снизу - 25 мм и слева - 25 мм.

Формулы и расчеты пишут чернилами, а чертежи и схемы делают карандашом; на графиках указывают масштаб. Решение задач обязательно ведут в системе СИ с указанием единиц измерения физических величин.

В начале каждой задачи следует привести краткое условие, расчетную схему и исходные данные для своего варианта. Обязательно приводить размерность всех найденных при расчете значений.

На титульном листе курсовой работы должно быть указано наименование министерства, университета и кафедры, фамилия, инициалы и шифр студента.

В конце работы необходимо привести список использованной литературы, затем поставить дату окончания работы и свою подпись.

Курсовые работы по курсу разработаны 50-вариантными. Вариант определяется двумя последними цифрами зачетной книжки студента или выдается преподавателем на свое усмотрение (например, по списку журнала).

После получения работы с оценкой и замечаниями преподавателя надо исправить отмеченные ошибки, выполнить все его указания и повторить недостаточно усвоенный материал.

Если курсовая работа получила неудовлетворительную оценку, то студент выполняет ее снова по-старому или новому варианту в зависимости от указания преподавателя и отправляет на повторную проверку.

2. Рабочая программа курса “Теоретические основы электротехники”

Рабочая программа разработана на основе требований Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования специальности 140400 - “Электроэнергетика и электротехника”.

Цель и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является овладение базовой электромеханической подготовкой, необходимой для исследования электромагнитных процессов в электротехнических и электромеханических устройствах, а также элементах электронной техники.

Задачи изучения дисциплины состоят в освоении:

- общих методов расчета и экспериментального исследования электрических цепей;
- приемов построения эквивалентных схем на основе соотношений электромагнетизма;
- способов формирования схемотехнических моделей и их анализа.

Требования к итоговым знаниям студентов

После изучения дисциплины студент должен:

- знать основы теории электрических и магнитных цепей;
- уметь читать и составлять электрические схемы;
- рассчитывать электрические цепи постоянного и переменного токов;
- проводить в лабораторных условиях экспериментальные исследования с применением измерительной аппаратурой.

Минимум содержания образовательной программы (по ГОС)

Законы электромагнитного поля; теория электрических и магнитных цепей; параметры элементов цепей, идеализированные элементы цепных моделей; общие принципы математической модели цепи.

Классификация цепей; основные теоремы линейных цепей; резистивные линейные цепи и их математическое моделирование; методы анализа простейших линейных цепей; законы Ома и Кирхгофа.

Источники ЭДС и тока. Внешняя характеристика, режимы работы, идеальный источник ЭДС и тока.

Разветвленные электрические цепи и методы их анализа: непосредственное применение законов Кирхгофа, контурных токов, методы двух узлов, эквивалентных преобразований, пропорциональных величин, принципа суперпозиции, эквивалентного активного двухполюсника и др.

Нелинейные электрические цепи, статические и динамические сопротивления; анализ нелинейных цепей с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов.

Основные виды воздействий (сигналов) в электрических цепях и их математическое моделирование.

Основные параметры и способы представления синусоидальных величин; математические модели; закон Ома и законы Кирхгофа применительно к цепям синусоидального тока; уравнения электрического состояния; векторные диаграммы на комплексной плоскости для цепи с последовательным и параллельным соединением элементов; резонанс напряжений и токов; колебания энергии и мощности в цепях синусоидального тока; активная, реактивная и полная мощности; ко-

эffiциент мощности, его технико-экономическое значение и способы повышения; методы анализа цепей синусоидального тока.

Трехфазные цепи, структура и элементы трехфазных цепей; способы представления электрических величин трехфазных систем; системы прямой и обратной последовательности чередования фаз; способы соединения фаз трехфазного источника питания и трехфазной нагрузки; фазные и линейные напряжения и токи; симметричные режимы трехфазной цепи; соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами при соединении элементов “треугольником” и “звездой”; несимметричные режимы трехфазной цепи; коэффициент мощности симметричных приемников и способы его повышения.

Понятие о переходных процессах, причины возникновения переходных процессов в электрических цепях и их значение для работы цепи; дифференциальные уравнения электрического состояния цепи; установившиеся и свободные составляющие токов и напряжений; законы коммутации и их использование для определения начальных условий влияние параметров цепи на длительность переходного процесса, постоянная времени; методы расчета переходных процессов.

Периодические несинусоидальные токи в электрических цепях, причины возникновения периодических несинусоидальных ЭДС, токов и напряжений; способы представления и параметры периодических несинусоидальных величин.

Четырехполюсники, определение коэффициентов четырехполюсника, электрические фильтры.

Электромагнитные устройства и их применение; ферромагнитные материалы и их характеристики; классификация магнитных цепей; магнитные цепи с постоянной и переменной магнитодвижущими силами (МДС); закон полного тока; прямая и обратная задачи расчета магнитной цепи; магнитная цепь с постоянным магнитом; принципы построения моделей технических систем; особенности магнитных цепей с переменными МДС; реальная и идеализированная катушка с ферромагнитным магнитопроводом; уравнения, векторные диаграммы, схемы замещения.

Однофазные трансформаторы, назначение, устройство, принцип действия и классификация трансформаторов; реальный и идеализированный трансформатор; уравнения магнитного и электрического состояния, схемы замещения; преобразование электроэнергии в трансформаторе и КПД трансформатора; режимы работы трансформатора; внешняя характеристика трансформатора.

Трехфазные трансформаторы, устройство, принцип действия, понятие о группах соединения обмоток; условия параллельной работы трехфазных трансформаторов.

Автотрансформаторы, принцип действия, особенности и область применения.

Измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Дроссель насыщения как управляемый нелинейный индуктивный элемент.

Связь дисциплины с другими дисциплинами

Настоящая дисциплина базируется на знаниях, полученных из курсов физики, высшей математики и вычислительной техники.

Знания, полученные при изучении дисциплины, используются при изучении дисциплин “Электрические машины”, “Электроника и микропроцессорная техника”, “Электроснабжение” и других дисциплинах, для изучения которых требуется электротехническая подготовка.

Тематика курсовых работ

Программой предусмотрено выполнение следующих двух курсовых работ:

1. Анализ электрического состояния цепей постоянного и однофазного синусоидального тока.
2. Анализ трехфазных цепей и расчет переходных процессов в линейной электрической цепи с сосредоточенными параметрами.

Рекомендуемая литература

Основная

1. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.1 и 2. – С.-Пб. Питер, 2004.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. -М.: Гардарика, 2002.
3. Сборник задач по ТОЭ./ Под ред. Л.А. Бессонова. - М.: ВШ, 2000.
4. Прянишников В.А. Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах. – С.-Пб. Корона принт. 2003.

Дополнительная

1. Электротехника и электроника. Кн. 1. Электрические и магнитные цепи. / Под ред. проф. В.Г. Герасимова. - М.: Энергоатомиздат, 1997.
2. Рекус Г.Г., Белоусов А.И. Сборник задач по электротехнике и основам электроники. -М.: Высш. шк., 2001.

3. Задания на выполнение курсовых работ.

3.1 Курсовая работа № 1

Курсовая работа №1 состоит из двух задач и посвящена анализу электрического состояния цепей постоянного и однофазного синусоидального тока.

На рис. 1...50 и рис. 2...50 представлены схемы линейных электрических цепей постоянного и однофазного синусоидального тока, состоящие из нескольких ветвей и узлов.

Ветвью электрической цепи называют такой ее участок, который состоит только из последовательно включенных источников ЭДС и сопротивлений. Во всех элементах ветви в любой момент времени ток имеет одно и то же значение.

Точки, в которых сходятся не менее трех ветвей, называются **узлами**.

Сложные цепи имеют несколько замкнутых контуров, состоящих из разных ветвей (рис. 1...50 и рис. 2...50).

Заданными обычно являются величины и направления всех ЭДС, значения внутренних и внешних сопротивлений, а требуется определить токи в ветвях.

Приступая к расчету электрических цепей, необходимо иметь четкое представление о схемах соединения (последовательное, параллельное, смешанное) как приемников, так и источников электрической энергии.

Анализ электрических цепей *с одним источником электрической энергии* проводится методом *свертывания схемы*, по которому отдельные участки схемы упрощают и постепенным преобразованием приводят схему к одному эквивалентному (входному) сопротивлению относительно зажимов источников питания. Схема упрощается с помощью замены группы последовательно или параллельно соединенных резисторов одним эквивалентным сопротивлением.

Кроме метода свертывания при анализе цепей с одним источником электрической энергии применяют метод *пропорциональных величин* (метод подобия).

При анализе цепей *с несколькими источниками электрической энергии* применяют следующие методы:

- метод, использующий 1-й и 2-й законы Кирхгофа;
- метод контурных токов;
- метод двух узлов (узлового напряжения);
- метод преобразования;
- метод наложения (суперпозиции);
- метод эквивалентного генератора (активного двухполюсника);
- метод узловых потенциалов.

С особенностями расчета электрических цепей названными методами можно ознакомиться в приведенной выше литературе.

Задача 1

Для электрической цепи, схемы которой изображены на рис. 1.1... 1.50 по заданным в табл. 1 сопротивлениям и ЭДС выполнить следующее:

- составить систему уравнений, необходимых для определения токов по первому и второму законам Кирхгофа;

- найти все токи в ветвях, пользуясь методом контурных токов;

- проверить правильность решения, применив метод узлового напряжения. Для этого необходимо предварительно упростить схему, заменив треугольник сопротивлений R_4 , R_5 и R_6 эквивалентной звездой. Начертить расчетную схему с эквивалентной звездой и указать на ней токи;

- определить ток в резисторе R_6 методом эквивалентного генератора;

- определить показание вольтметра и составить баланс мощностей для заданной схемы;

- построить в масштабе потенциальную диаграмму для внешнего контура.

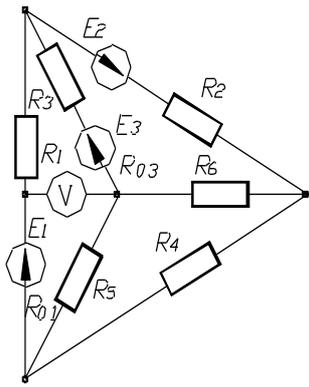


Рис. 1.1

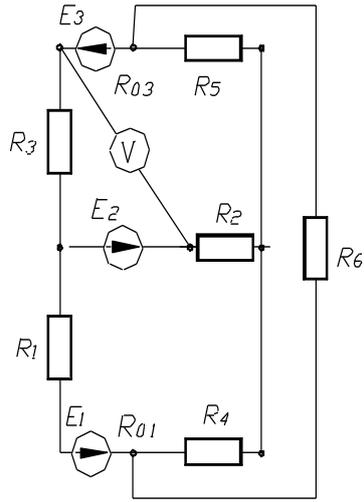


Рис. 1.2

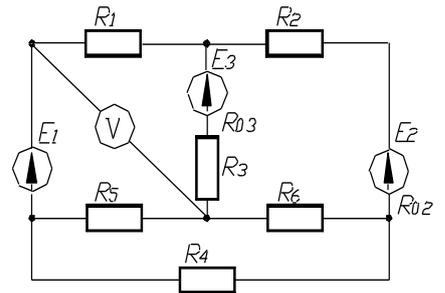


Рис. 1.3

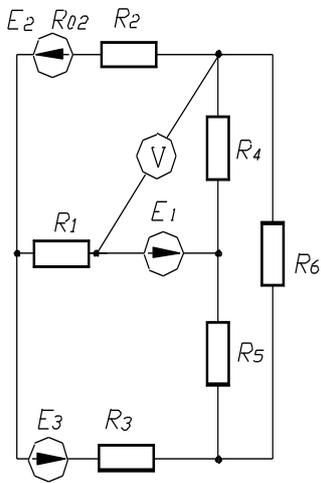


Рис. 1.4

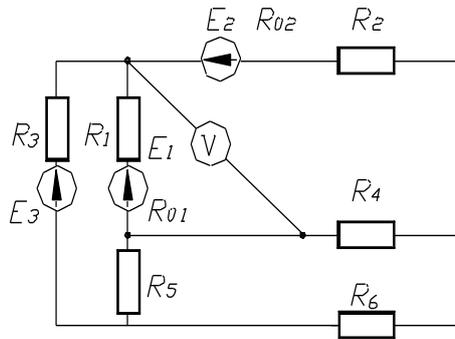


Рис. 1.5

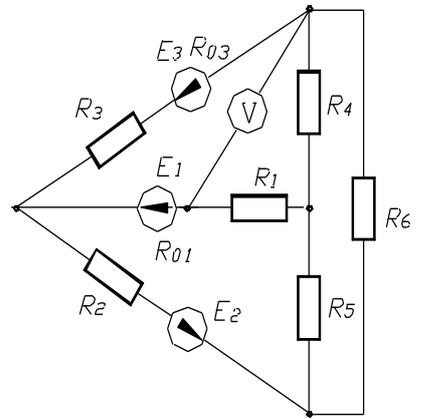


Рис. 1.6

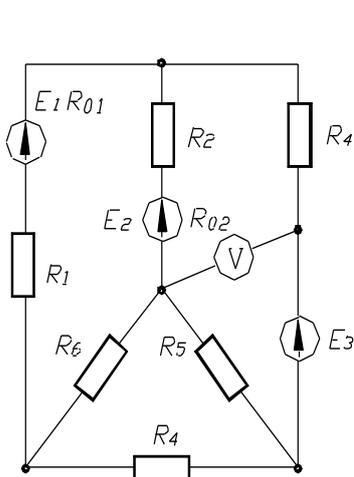


Рис. 1.7

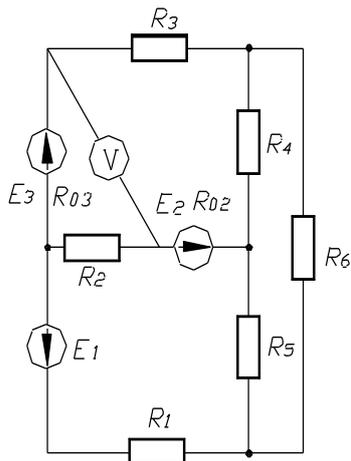


Рис. 1.8

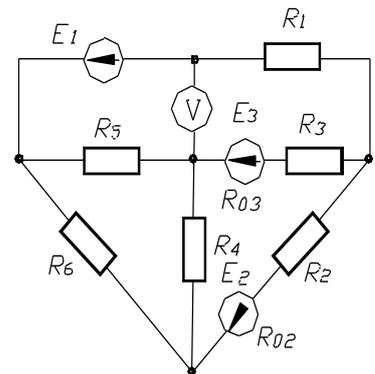


Рис. 1.9

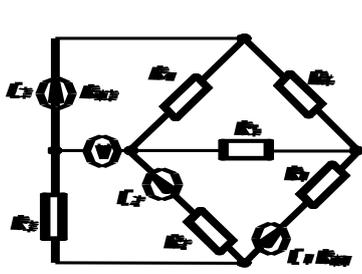


Fig. 1-10

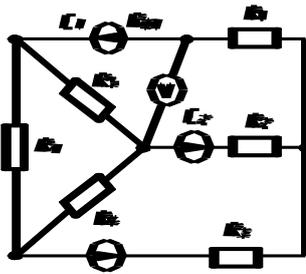


Fig. 1-11

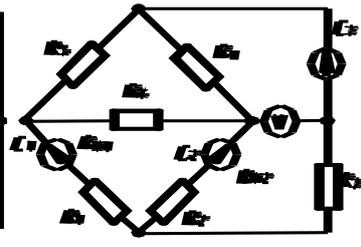


Fig. 1-12

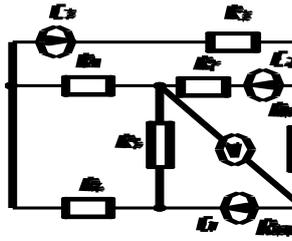


Fig. 1-13

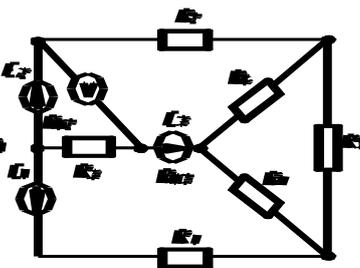


Fig. 1-14

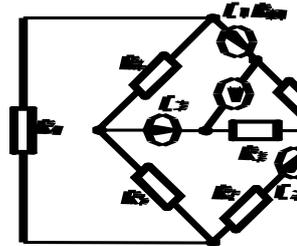


Fig. 1-15

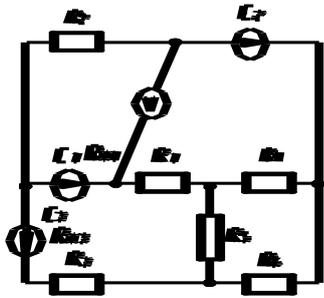


Fig. 1-16

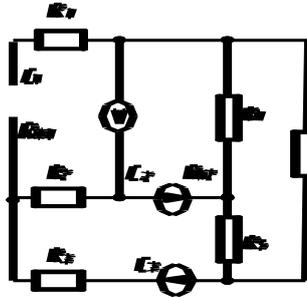


Fig. 1-17

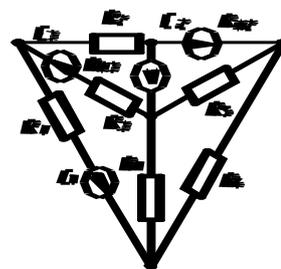


Fig. 1-18

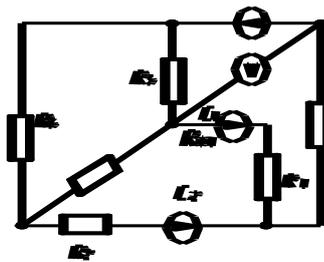


Fig. 1-19

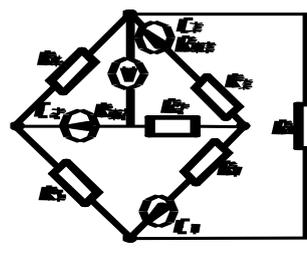


Fig. 1-20

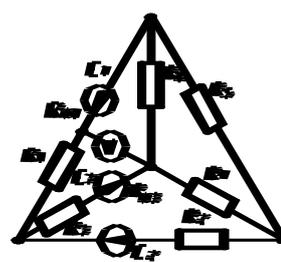


Fig. 1-21

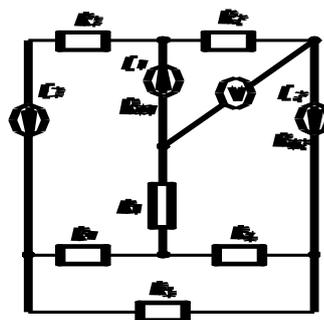


Fig. 1-22

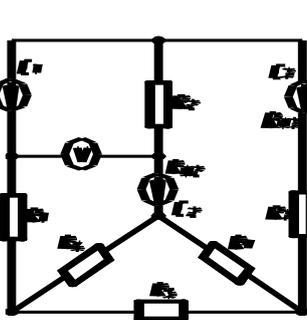


Fig. 1-23

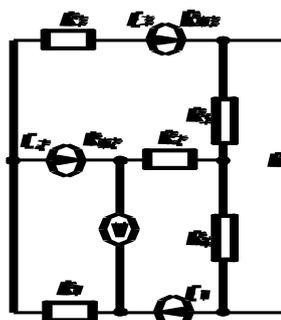


Fig. 1-24

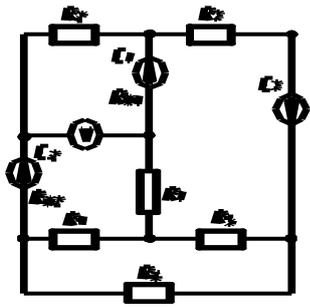


Fig. 1-25

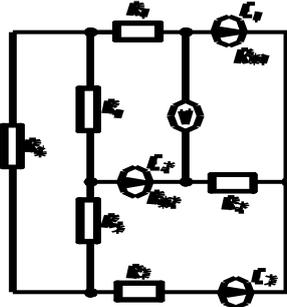


Fig. 1-26

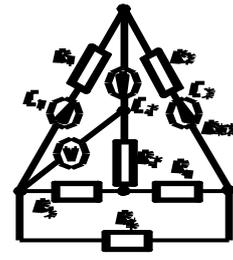


Fig. 1-27

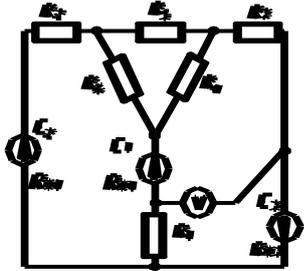


Fig. 1-28

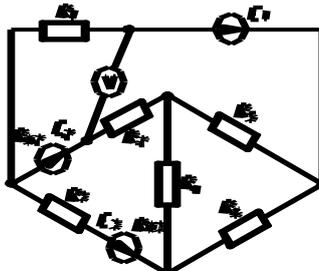


Fig. 1-29

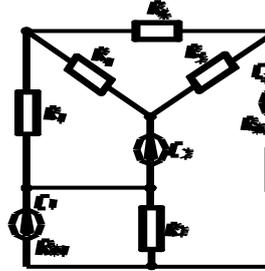


Fig. 1-30

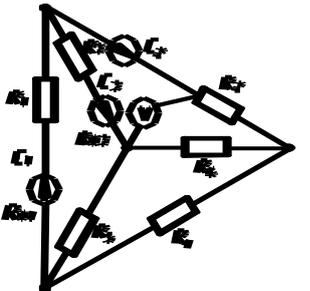


Fig. 1-31

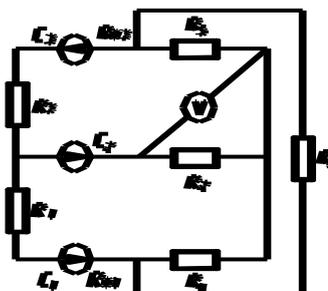


Fig. 1-32

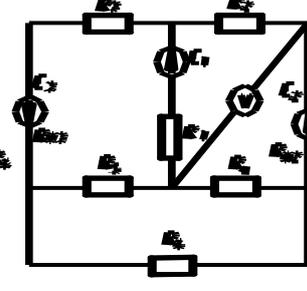


Fig. 1-33

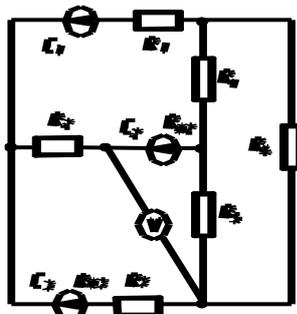


Fig. 1-34

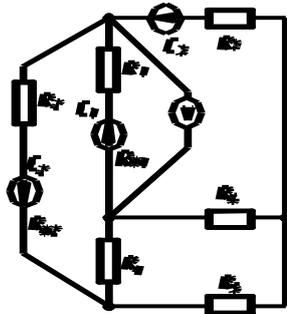


Fig. 1-35

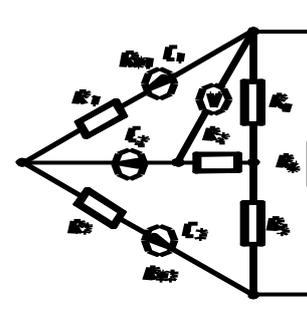


Fig. 1-36

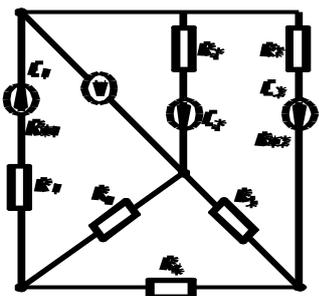


Fig. 1-37

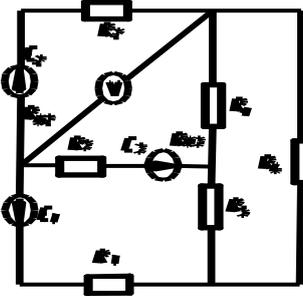


Fig. 1-38

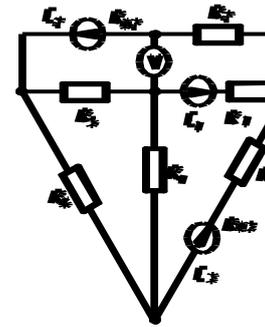


Fig. 1-39

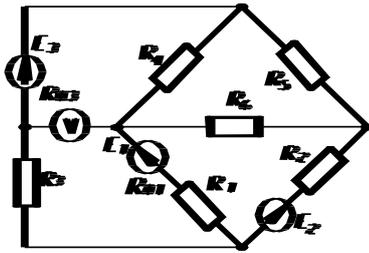


Fig. 1.40

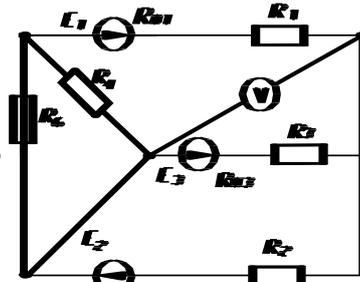


Fig. 1.41

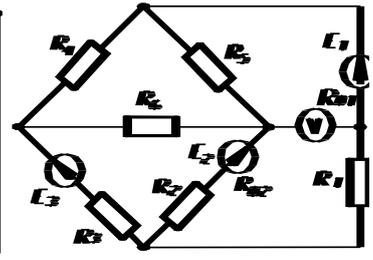


Fig. 1.42

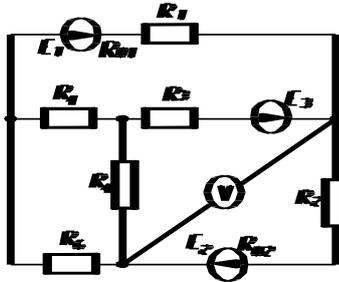


Fig. 1.43

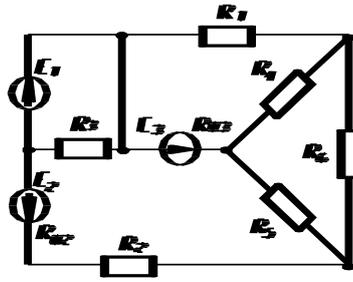


Fig. 1.44

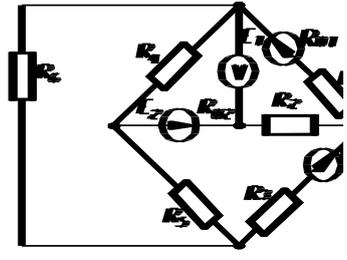


Fig. 1.45

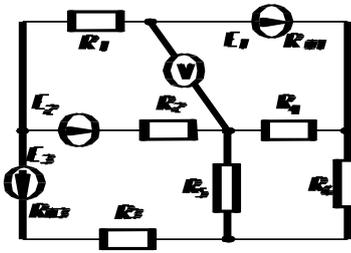


Fig. 1.46

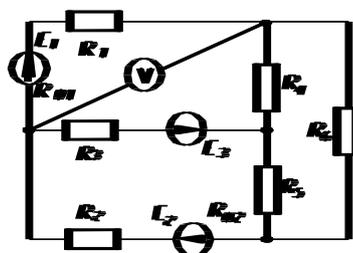


Fig. 1.47

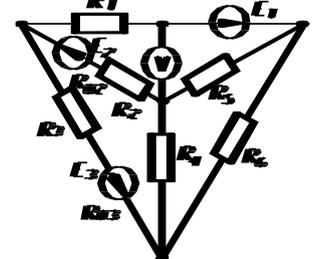


Fig. 1.48

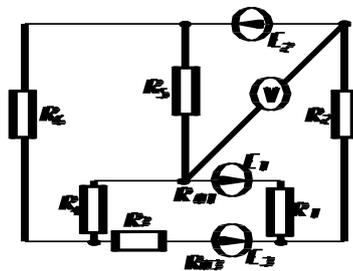


Fig. 1.49

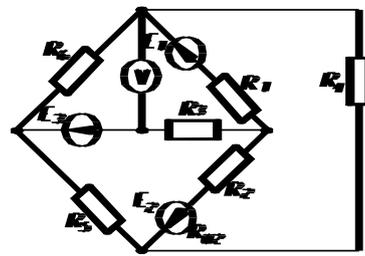


Fig. 1.50

После изучения раздела “Электрические цепи постоянного тока” и выполнения задачи 1 студенты должны:

1. Знать области применения электротехнических устройств постоянного тока; способы соединения электрических устройств; методику составления уравнений электрического состояния линейных цепей; примеры нелинейных элементов и их вольтамперные характеристики.

2. Понимать эквивалентность схем источников ЭДС и тока; смысл вольтамперных характеристик, приемных и внешних характеристик генерирующих устройств; сущность энергетических процессов, происходящих в генерирующих приемных устройствах; возможности осуществления взаимных преобразований схем соединений пассивных элементов треугольником и звездой; замены нелинейного элемента эквивалентной схемой замещения с линейными элементами.

3. Уметь проводить анализ линейных электрических цепей методами свертывания, непосредственного применения законов Кирхгофа, узлового напряжения; составлять уравнения баланса электрической мощности; определять ток любой ветви сложной электрической цепи методом эквивалентного генератора; применять метод пересечения характеристик для определения тока в нелинейной цепи.

Таблица 1- Исходные данные к задаче 1

Номер		E_1	E_2	E_3	R_{01}	R_{02}	R_{03}	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
варианта	рисунка	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
0	1.1	22	24	10	0,2	-	1,2	2	1	8	4	10	6
1	1.1	55	18	4	0,8	-	0,8	8	4	3	2	4	4
2	1.2	36	10	25	0,4	-	0,5	4	8	3	1	2	7
3	1.3	16	5	32	-	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
4	1.4	14	25	28	0,9	1,2	-	5	2	8	2	2	6
5	1.5	20	22	9	0,1	1,1	-	1	2	6	3	8	4
6	1.6	5	16	30	0,4	-	0,7	6	4	3	2	5	3
7	1.7	10	6	24	0,8	0,3	-	3,5	5	6	6	3	1
8	1.8	6	20	4	-	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
9	1.9	21	4	10	-	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1
10	1.10	4	9	18	0,8	-	0,7	2,7	10	4	8	10	2
11	1.11	4	24	6	0,9	-	0,5	9,0	8	1	6	10	4
12	1.12	16	8	9	0,2	0,6	-	2,5	6	6	5	10	5
13	1.13	48	12	6	0,8	1,4	-	4,2	4	2	12	6	2
14	1.14	12	36	12	-	0,4	1,2	3,5	5	1	5	6	9
15	1.15	12	6	40	1,2	0,6	-	2,0	3	8	5	7	8
16	1.16	8	6	36	1,3	-	1,2	3,0	2	1	6	8	6
17	1.17	72	12	4	0,7	1,5	-	6,0	1	10	4	12	4
18	1.18	12	48	6	-	0,4	0,4	2,5	1	4	15	2	2
19	1.19	12	30	9	0,5	-	0,5	3,5	2	3	3	1	3
20	1.20	9	6	27	-	1,0	0,8	4,5	2	8	13	4	3
21	1.21	15	63	6	1,0	-	1,2	5,0	3	1	2	12	3
22	1.22	54	27	3	1,2	0,9	-	8,0	3	1	4	2	2
23	1.23	36	9	24	-	0,8	0,8	3,0	4	2	1	5	1
24	1.24	3	66	9	-	0,7	1,2	1,0	4	2	2	7	3
25	1.25	12	30	25	1,0	0,4	-	1,0	5	1	1	6	4
26	1.26	30	16	10	0,6	0,8	-	2,0	5	3	1	8	5
27	1.27	10	32	10	0,6	-	1,0	1,5	6	1	7	1	5
28	1.28	5	10	36	0,3	-	0,8	1,2	6	3	2	2	2
29	1.29	40	25	8	-	0,2	0,2	3,0	3	2	4	3	2
30	1.30	8	40	10	0,8	1,0	-	5,0	3	3	3	2	1
31	1.31	22	24	10	0,2	-	1,2	2	1	8	4	10	6
32	1.32	55	18	4	0,8	-	0,8	8	4	3	2	4	4
33	1.33	36	10	25	-	0,4	0,5	4	8	3	1	2	7
34	1.34	16	5	32	-	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
35	1.35	14	25	28	0,9	1,2	-	5	2	8	2	2	6
36	1.36	5	16	30	0,4	-	0,7	6	4	3	2	5	3
37	1.37	10	6	24	0,8	0,3	-	3,5	5	6	6	3	1

38	1.38	6	20	4	-	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
39	1.39	21	4	10	-	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1
40	1.40	4	9	18	00,8	-	0,7	2,7	10	4	8	10	2
41	1.41	4	24	6	0,9	-	0,5	9,0	8	1	6	10	4
42	1.42	16	8	9	0,2	0,6	-	2,5	6	6	5	10	5
43	1.43	48	12	6	0,8	1,4	-	4,2	4	2	12	6	2
44	1.44	12	36	12	-	0,4	1,2	3,5	5	1	5	6	9
45	1.45	12	6	40	1,2	0,6	-	2,0	3	8	5	7	8
46	1.46	8	6	36	1,3	-	1,2	3,0	2	1	6	8	6
47	1.47	72	12	4	0,7	1,5	-	6,0	1	10	4	12	4
48	1.48	12	48	6	-	0,4	0,4	2,5	1	4	15	2	2
49	1.49	12	30	9	0,5	-	0,5	3,5	2	3	3	1	3
50	1.50	9	6	27	-	1,0	0,8	4,5	2	8	13	4	3

Задача 2

Задача № 2 посвящена анализу линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока комплексным методом.

В комплексном методе расчета электрических цепей переменного тока ЭДС, напряжения, токи и сопротивления представляют в виде комплексов. Комплексные значения величин, изменяющихся по гармоническому закону, обозначают соответствующими прописными буквами, над которыми ставят точку: $\dot{E}, \dot{U}, \dot{I}$. Для обозначения модулей этих величин применяют те же буквы, но без точек над ними: E, U, I .

Комплекс полного сопротивления обозначают буквой \underline{Z} (без точки), комплекс полной проводимости - буквой \underline{Y} (без точки). Модули этих величин обозначают соответствующими строчными буквами Z и Y .

Комплексные числа записываются в одной из следующих форм:

- алгебраическая форма

$$\dot{A} = a + jb$$

- тригонометрическая форма

$$\dot{A} = A (\cos \alpha + j \sin \alpha)$$

- показательная форма

$$\dot{A} = A e^{j\alpha}$$

- полярная форма

$$\dot{A} = A \angle \alpha,$$

где A - модуль комплексного числа

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}$$

α - аргумент комплексного числа

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{b}{a}$$

$j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица.

Если напряжение и ток изменяются по закону синуса

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u); \quad i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i),$$

то эти величины в комплексной форме записываются:

$$\dot{U} = U e^{j\varphi_u} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_u} \quad \dot{I} = I e^{j\varphi_i} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_i}.$$

Комплекс полного сопротивления цепи, состоящей из последовательно включенных R, L и C , записывается

$$\underline{Z} = R + j\omega L - j \frac{1}{\omega C} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = R + jX = Z e^{j\varphi},$$

где $X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ - реактивное сопротивление цепи, Ом;

Z - полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2};$$

φ - угол сдвига фаз между напряжением и током в электрической цепи, град.

$$\varphi = \operatorname{arctg} (X/R)$$

Для расчета цепей синусоидального переменного тока комплексным методом применяются все методы, известные из теории электрических цепей постоянного тока. Все отличие состоит в том, что вместо действительных чисел, соответствующих токам, напряжениям и сопротивлениям в цепях постоянного тока, при расчете цепей переменного тока используются комплексные числа.

При расчете электрической цепи целесообразно при умножении и делении комплексных чисел использовать показательную форму их записи, а при сложении и вычитании - алгебраическую форму их записи.

Для электрической цепи, схема которой изображена на рис. 2.1 ... 2.50, по заданным в табл. 2 параметрам и ЭДС источника питания определить:

- токи во всех ветвях цепи и напряжения на отдельных элементах;
- составить баланс активной и реактивной мощностей;
- построить в масштабе на комплексной плоскости векторную диаграмму токов и напряжений и потенциальную диаграмму напряжений по внешнему контуру;
- показание вольтметра и активную мощность, измеряемую ваттметром.

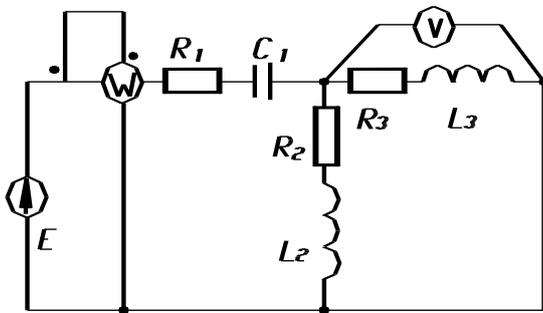


Рис. 2.1

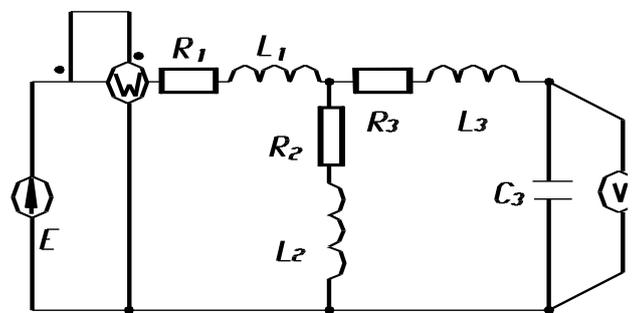


Рис. 2.2

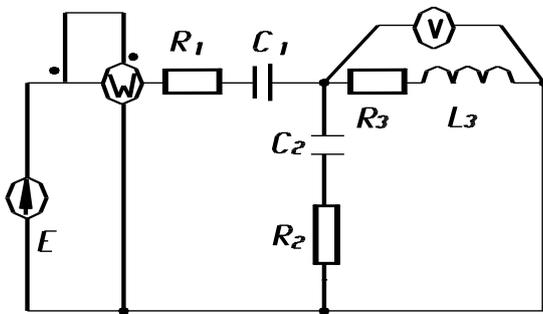


Рис. 2.3

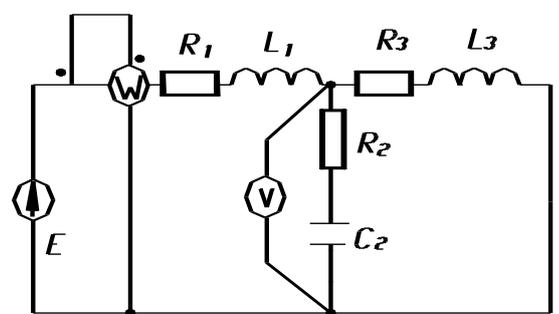


Рис. 2.4

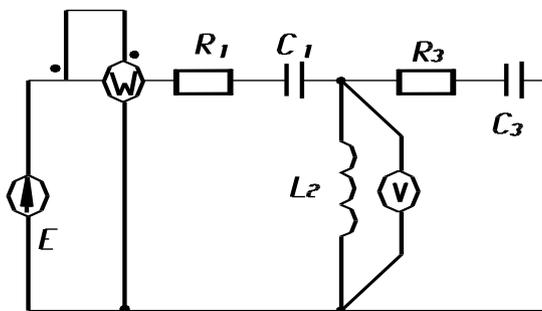


Рис. 2.5

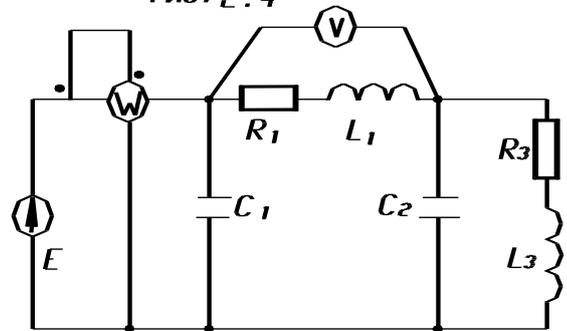


Рис. 2.6

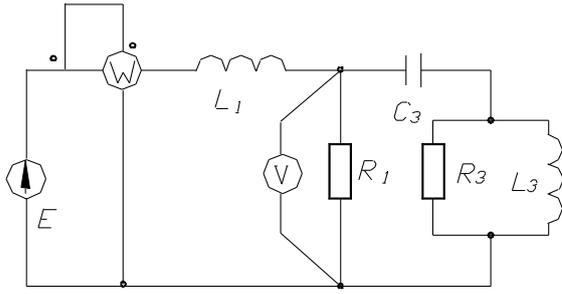


Рис. 2.7

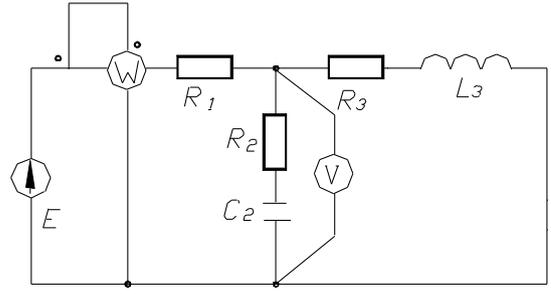


Рис. 2.8

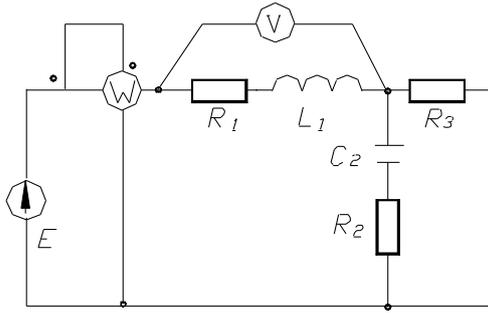


Рис. 2.9

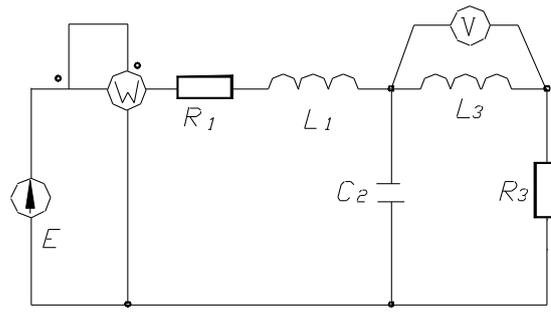


Рис. 2.10

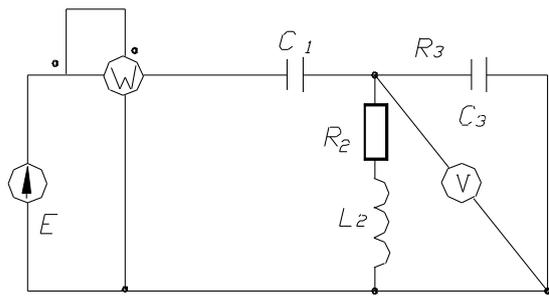


Рис. 2.11

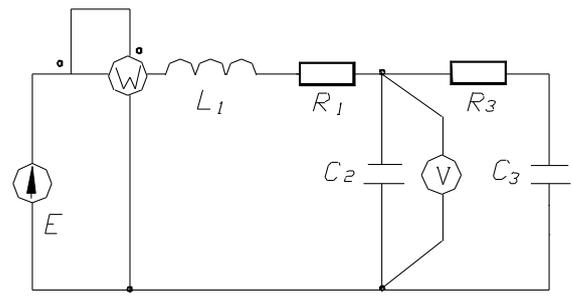


Рис. 2.12

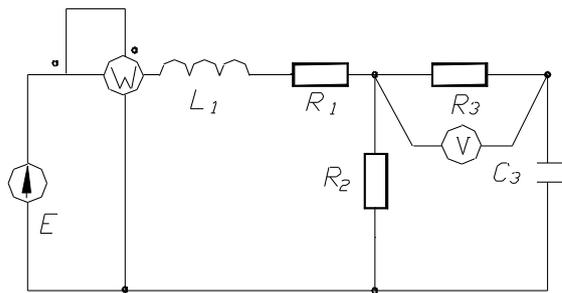


Рис. 2.13

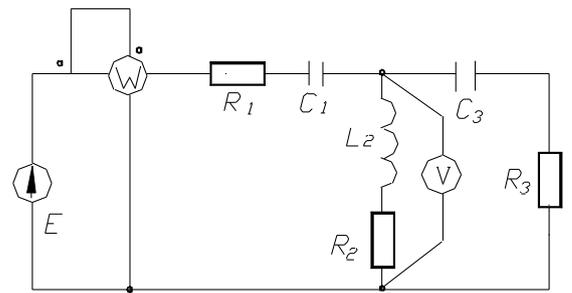


Рис. 2.14

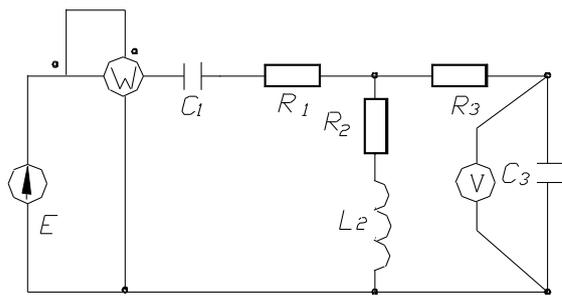


Рис. 2.15

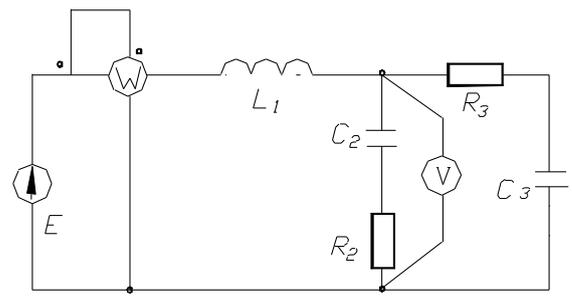


Рис. 2.16

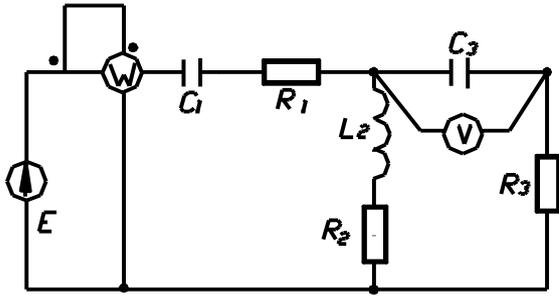


Рис. 2.17

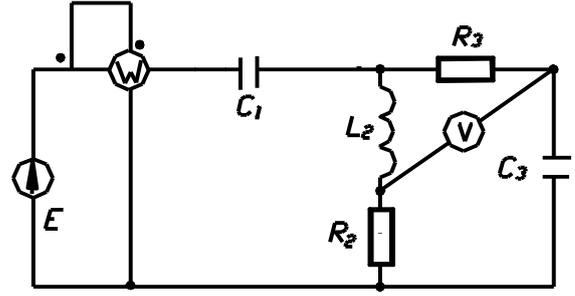


Рис. 2.18

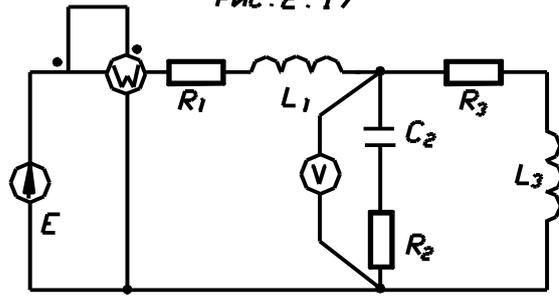


Рис. 2.19

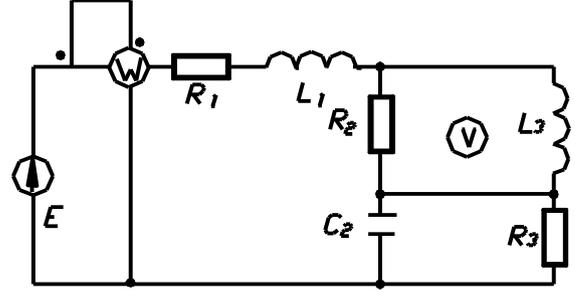


Рис. 2.13

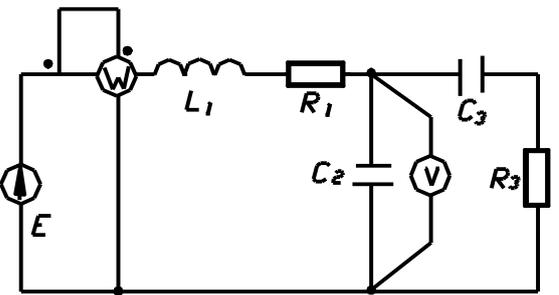


Рис. 2.21

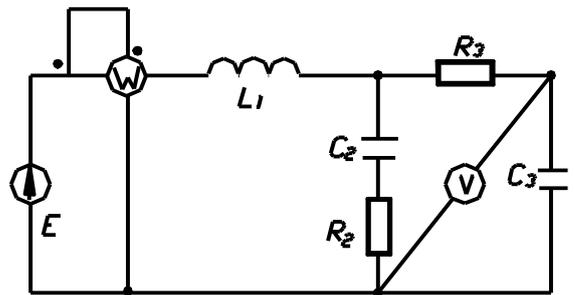


Рис. 2.22

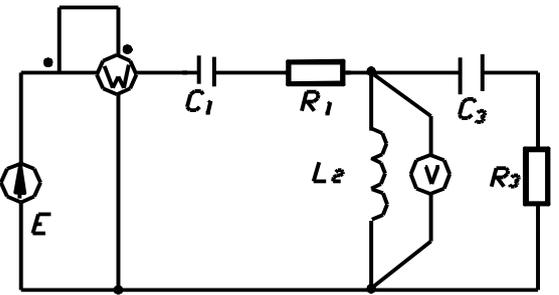


Рис. 2.23

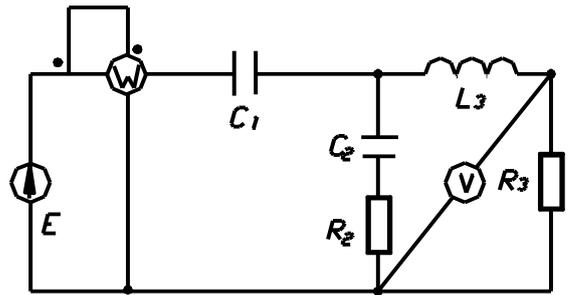


Рис. 2.24

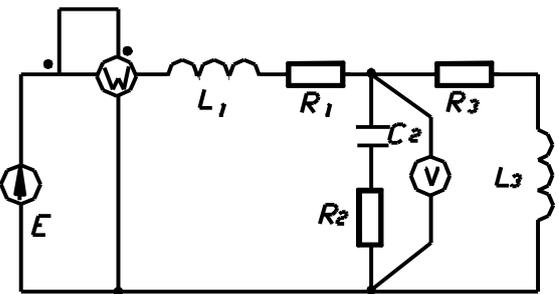


Рис. 2.25

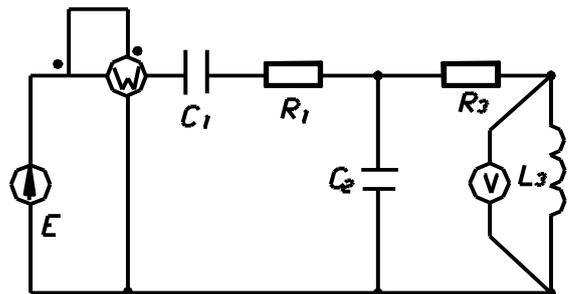


Рис. 2.26

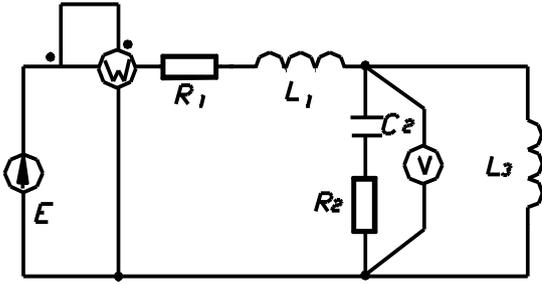


Рис. 2.27

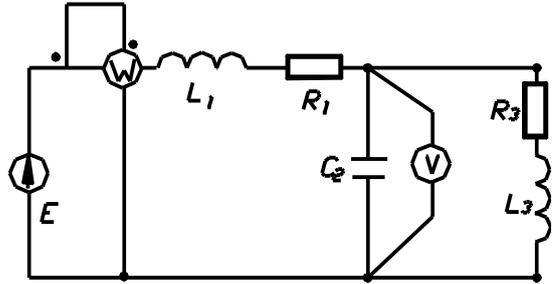


Рис. 2.28

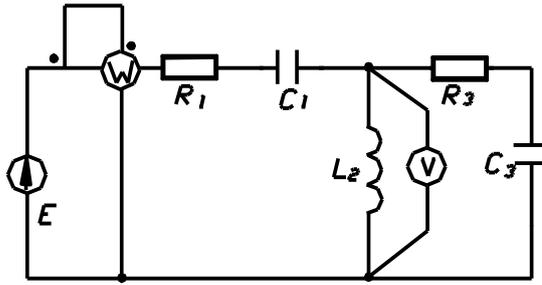


Рис. 2.29

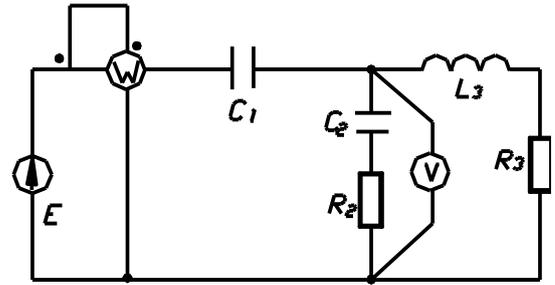


Рис. 2.30

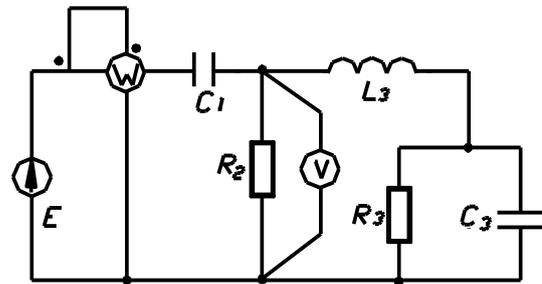


Рис. 2.31

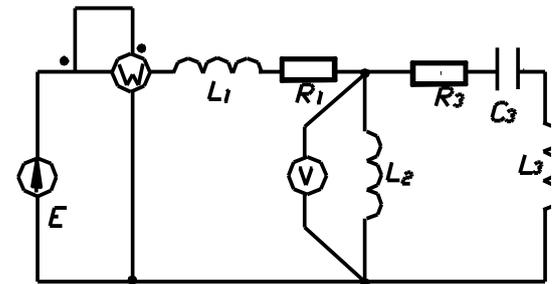


Рис. 2.32

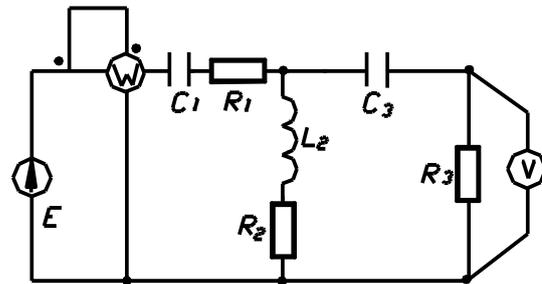


Рис. 2.33

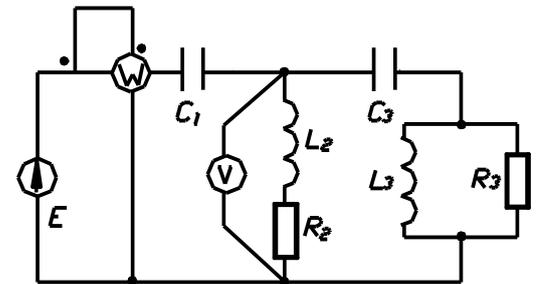


Рис. 2.34

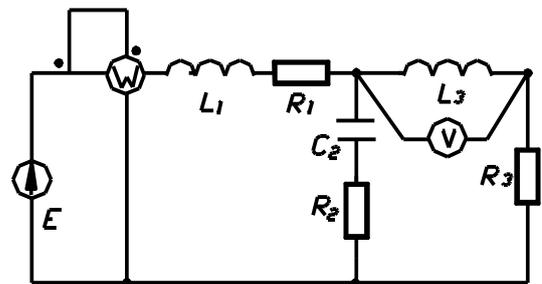


Рис. 2.35

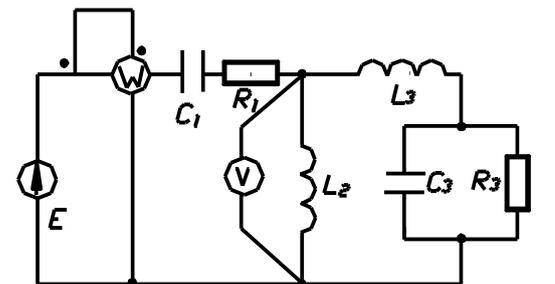
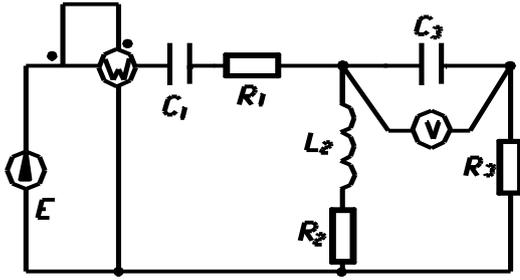
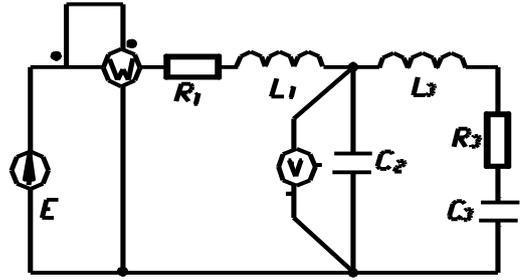


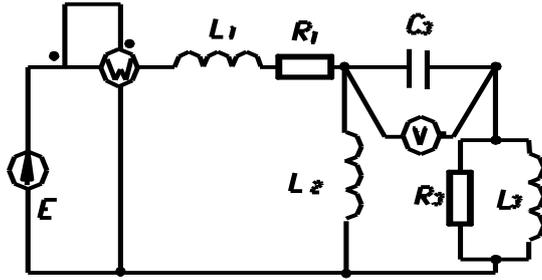
Рис. 2.36



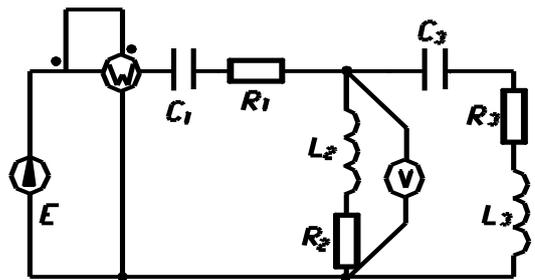
Pnc. 2.37



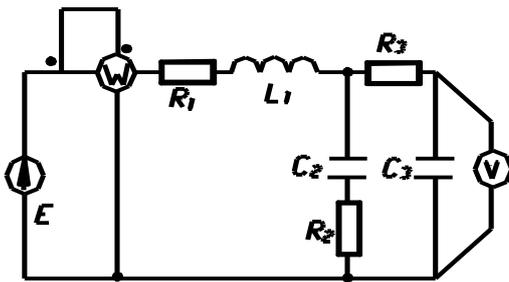
Pnc. 2.38



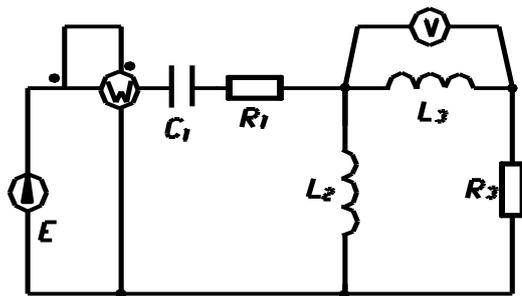
Pnc. 2.39



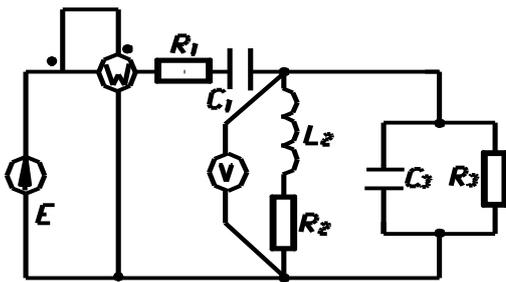
Pnc. 2.40



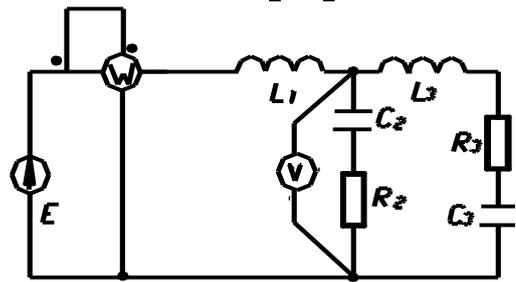
Pnc. 2.41



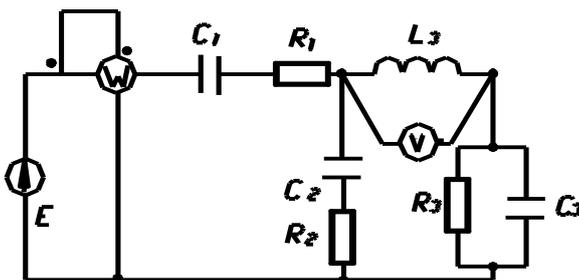
Pnc. 2.42



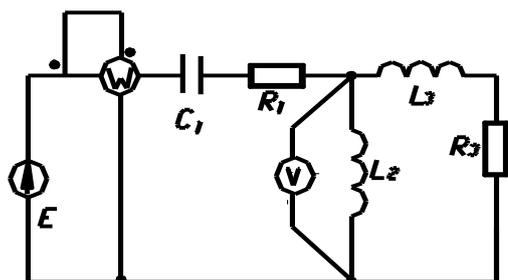
Pnc. 2.43



Pnc. 2.44



Pnc. 2.45



Pnc. 2.46

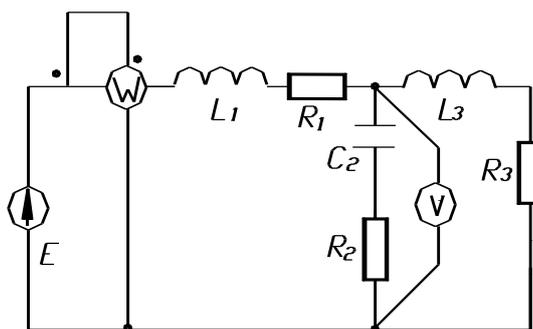


Рис. 2.47

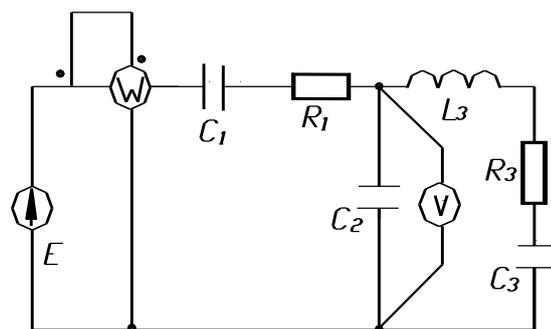


Рис. 2.48

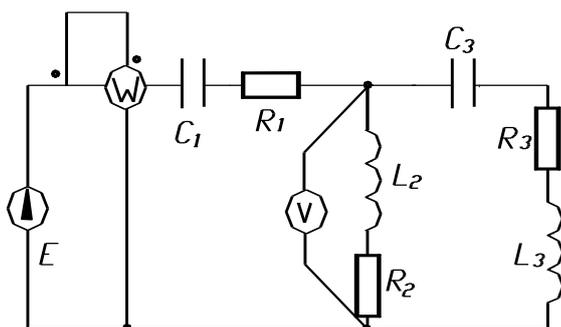


Рис. 2.49

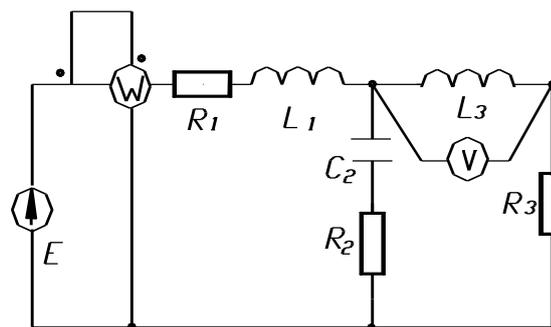


Рис. 2.50

В результате изучения раздела “Однофазные цепи переменного синусоидального тока” и выполнения задачи 2 студенты должны:

1. Знать содержание терминов: резистор, сопротивление, индуктивная катушка, индуктивность, индуктивное сопротивление, конденсатор, емкость, емкостное сопротивление, фаза, начальная фаза, угол сдвига фазы, период, частота, угловая частота, мгновенное, действующее и среднее значения гармонических величин, полное, активное, реактивное, комплексное сопротивление и проводимости, полная, активная, реактивная, комплексная мощности, условия получения резонансов напряжений и токов.

2. Понимать особенности электромагнитных процессов и энергетические соотношения в цепях синусоидального тока, экономическое значение коэффициента мощности, особенности анализа простейших электрических цепей с магнит связанными элементами.

3. Уметь составлять дифференциальные и комплексные уравнения электрического состояния линейных цепей; представлять гармонически изменяющиеся величины тригонометрическими функциями, графиками, вращающимися векторами и комплексными числами; строить векторные диаграммы неразветвленных цепей и цепей с параллельным соединением ветвей; определять опытным путем параметры схемы замещения пассивных двухполюсников; с помощью электроизмерительных приборов измерять токи, напряжения и мощности в электрических цепях; строить потенциальную (топографическую) диаграмму для неразветвленных цепей и цепей с параллельным соединением ветвей.

Таблица 2 – Исходные данные к задаче 2

Номер		E, В	f, Гц	C ₁ , мкФ	C ₂ , мкФ	C ₃ , мкФ	L ₁ , мГн	L ₂ , мГн	L ₃ , мГн	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом
вари- анта	ри- сунка											
0	2.1	150	50	637	-	-	-	31,8	15,9	2	3	4
1	2.1	100	50	318	-	-	-	9	15,9	8	3	4
2	2.2	120	50	-	-	637	31,8	15,9	15,9	8	3	4
3	2.3	200	50	637	300	-	-	-	15,9	8	3	4
4	2.4	220	50	-	318	-	9,55	-	31,8	8	4	4
5	2.5	50	50	100	-	159	-	115	-	10	-	100
6	2.6	100	50	100	300	-	15,9	-	115	10	-	100
7	2.7	120	50	-	-	100	15,9	-	115	-	4	100
8	2.8	200	50	-	159	-	-	-	115	10	4	100
9	2.9	220	50	-	318	-	15,9	-	-	10	4	100
10	2.10	50	50	-	637	-	15,9	-	6,37	5	-	8
11	2.11	100	50	637	-	100	-	15,7	-	-	10	8
12	2.12	120	50	-	300	100	31,8	-	-	5	-	8
13	2.13	200	50	-	-	100	31,8	-	-	5	10	8
14	2.14	220	50	637	-	200	-	15,9	-	5	10	8
15	2.15	150	50	100	-	200	-	15,9	-	10	2	10
16	2.16	100	50	-	1600	200	31,8	-	-	-	8	10
17	2.17	120	50	100	-	200	-	15,9	-	10	8	10
18	2.18	200	50	637	-	200	-	31,8	-	-	8	10
19	2.19	220	50	-	1600	-	31,8	-	95	10	8	-
20	2.20	50	50	-	159	-	31,8	-	95	15	10	10
21	2.21	100	50	-	159	200	15,9	-	-	15	-	10
22	2.22	120	50	-	159	200	15,9	-	-	-	10	20
23	2.23	200	50	637	-	200	-	31,8	-	15	-	20
24	2.24	220	50	637	159	-	-	-	95	-	10	20
25	2.25	150	50	-	159	-	25	-	95	6	10	20
26	2.26	100	50	637	159	-	-	-	95	6	-	20
27	2.27	100	50	-	159	-	25	-	95	6	4	-
28	2.28	200	50	-	159	-	25	-	95	6	-	20
29	2.29	220	50	637	-	637	-	9	-	6	-	20
30	2.30	50	50	318	637	-	-	-	31,8	-	10	40
31	2.31	100	50	318	-	300	-	-	31,8	-	10	10
32	2.32	120	50	-	-	300	19,1	15,9	31,8	40	-	10
33	2.33	200	50	318	-	300	-	15,9	-	10	10	40
34	2.34	220	50	318	-	300	-	15,9	31,8	-	10	10
35	2.35	50	50	-	318	-	19,5	-	31,8	8	10	4
36	2.36	100	50	637	-	200	-	31,8	95	8	-	4
37	2.37	150	50	637	-	200	-	31,8	-	8	10	4
38	2.38	200	50	-	318	200	15,9	-	95	8	-	4
39	2.39	220	50	-	-	200	15,9	31,8	95	8	-	4
40	2.40	50	50	637	-	200	-	31,8	95	4	40	40
41	2.41	100	50	-	318	200	9,55	-	-	4	40	4
42	2.42	120	50	500	-	-	-	15,9	95	4	-	4
43	2.43	200	5	500	-	159	-	15,9	-	40	10	40
44	2.44	220	50	-	318	159	9,55	-	95	-	10	40
45	2.45	50	50	500	159	159	-	-	31,8	35	20	40
46	2.46	100	50	500	-	-	-	15,9	31,8	35	-	40
47	2.47	120	50	-	159	-	15,9	-	31,8	35	20	80
48	2.48	200	50	318	318	159	-	-	31,8	35	20	80
49	2.49	220	50	318	-	159	-	31,8	31,8	35	20	80
50	2.50	50	50	-	318	-	15,9	-	31,8	5	10	80

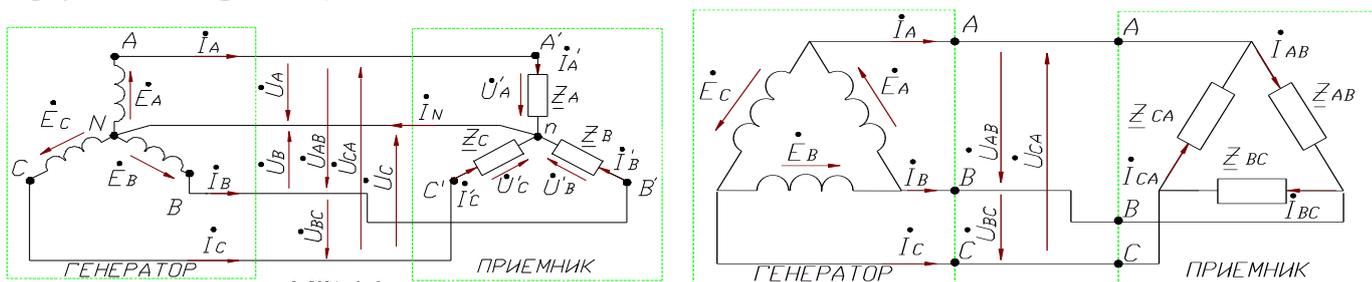
3.2 Курсовая работа №2

Курсовая работа № 2 состоит из двух задач и посвящена анализу электрического состояния трехфазных цепей при различных режимах работы приемника электрической энергии и расчету переходных процессов в электрических цепях с сосредоточенными параметрами.

Задача 1

Трехфазная система электрических токов (ЭДС, напряжений) - это совокупность трех синусоидальных электрических токов (ЭДС, напряжений) одной частоты, сдвинутых по фазе друг относительно друга на угол 120° . Часть этой системы, где проходит один из трех токов, называется **фазой трехфазной системы**.

Если отдельные фазы генератора и приемника соединены между собой, то такую систему называют связанной системой, в которой фазы могут быть соединены в “звезду” (рис. 3.1) или в “треугольник” (рис. 3.2).



При соединении в “звезду” линейные токи равны соответствующим фазным токам, т.е. $I_L = I_\phi$.

Линейное напряжение равно геометрической разности соответствующих векторов фазных напряжений, т.е.: $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$; $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$; $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$.

Для симметричной системы напряжений ($Z_A = Z_B = Z_C$) при соединении в “звезду” $U_L = \sqrt{3}U_\phi$.

Векторная сумма линейных напряжений при соединении в “звезду” всегда равна нулю.

В четырехпроводной системе (рис. 3.1) ток в нейтральном проводе равен векторной сумме токов отдельных фаз

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

При соединении в “треугольник” (рис. 3.2) фазные напряжения на генераторе являются и линейными, т.е.: $\dot{U}_A = \dot{U}_{AB}$; $\dot{U}_B = \dot{U}_{BC}$; $\dot{U}_C = \dot{U}_{CA}$.

Линейный ток равен геометрической разности векторов соответствующих фазных токов, т.е. $\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}$; $\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}$; $\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$.

При симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке, т.е. при $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$, имеем $I_L = \sqrt{3}I_\phi$.

Приемник, обмотки которого соединены по схеме “звезда” или “треугольник, питается от сети с напряжением U (задается номером варианта). Сопротивления фаз обмоток приведены в табл.3. Требуется определить:

- фазные и линейные токи приемника;
- активную, реактивную и полную мощность приемника при нормальном режиме работы;
- коэффициент мощности приемника при нормальном режиме работы;
- рассчитать параметры цепи и построить векторную диаграмму токов и напряжений приемника при обрыве провода или фазы согласно задания;
- рассчитать параметры цепи при коротком замыкании фазы при отсутствии нулевого провода и построить при этом режиме векторную диаграмму токов и напряжений приемника.

Таблица 3

Номер варианта	Схема соединения приемника	Напряжение, В	Z_A , Ом	Z_B , Ом	Z_C , Ом	Z_{AB} , Ом	Z_{BC} , Ом	Z_{CA} , Ом	Обрыв провода	К.З. фазы	Обрыв фазы	Примечание
0	Δ	$U_{л}=127$	-	-	-	$-j20$	$8+j6$	10	А	-	СА	
1	Y	$U_{л}=220$	$6+j8$	$10-j10$	$5+j5$	-	-	-	В	С*	-	
2	Y	$U_{л}=220$	$6-j8$	$8+j6$	$10+j5$	-	-	-	А	В*	-	
3	Δ	$U_{л}=380$	-	-	-	$20+j15$	$20+j15$	$36-j24$	В	-	АВ	
4	Δ	$U_{л}=380$	-	-	-	$10+j15$	$15-j15$	$10+j10$	А	-	АС	
5	Y	$U_{ф}=220$	$10+j5$	$10+j10$	$6-j8$	-	-	-	С	А*	-	
6	Y	$U_{л}=380$	$10+j10$	$15-j15$	$20+j20$	-	-	-	А	С*	-	
7	Y	$U_{л}=380$	$16+j12$	$12-j16$	$9+j12$	-	-	-	В	А*	-	
8	Δ	$U_B=220$	-	-	-	$12+j9$	$10+j10$	$10-j15$	В	-	ВС	
9	Δ	$U_{л}=380$	-	-	-	$20-j10$	$10+j8$	$10+j10$	А	-	ВС	
10	Δ	$U_{л}=220$	-	-	-	$20+j10$	$6+j8$	$10-j10$	В	-	СА	
11	Y	$U_{л}=220$	$6-j6$	$6+j8$	$8+j6$	-	-	-	А	В	-	
12	Δ	$U_{л}=400$	-	-	-	$10+j10$	$6+j8$	$10-j10$	А	-	АВ	
13	Y	$U_{л}=230$	$5-j5$	$6+j8$	$8+j10$	-	-	-	А	В*	-	
14	Y	$U_{ф}=127$	$-j5$	$10+j8$	$8+j10$	-	-	-	В	С	-	
15	Y	$U_{л}=220$	$j10$	$6-j8$	$3+j4$	-	-	-	А	А	-	
16	Y	$U_{л}=380$	$-j5$	$3+j4$	$4-j3$	-	-	-	С	В	-	
17	Y	$U_{л}=380$	$j20$	$6-j8$	$5-j5$	-	-	-	В	А*	-	
18	Y	$U_{л}=220$	$6+j10$	$10-j6$	$3+j4$	-	-	-	С	В	-	
19	Δ	$U_{л}=230$	-	-	-	$6-j8$	$3+j4$	$5-j5$	В	-	АС	
20	Δ	$U_{л}=380$	-	-	-	$3-j4$	$5+j10$	$6-j8$	А	-	АВ	
21	Y	$U_{л}=220$	$5-j5$	$3-j4$	$6+j8$	-	-	-	С	В	-	
22	Y	$U_{л}=220$	$5+j5$	$3-j4$	$10-j8$	-	-	-	С	А	-	
23	Δ	$U_{л}=220$	-	-	-	$9-j12$	$3+j4$	$6-j8$	В	-	АВ	
24	Δ	$U_{л}=380$	-	-	-	$4+j3$	$8-j6$	$-j10$	С	-	ВС	
25	Δ	$U_{л}=220$	-	-	-	$3-j4$	$6-j8$	$4+j3$	В	-	СА	
26	Y	$U_{л}=380$	$6-j8$	$3+j4$	$j10$	-	-	-	А	С*	-	
27	Δ	$U_{л}=220$	-	-	-	$10-j10$	$10+j10$	20	А	-	ВС	

* – Без нулевого провода

Номер варианта	Схема соединения приемника	Напряжение, В	Z_A , Ом	Z_B , Ом	Z_C , Ом	Z_{AB} , Ом	Z_{BC} , Ом	Z_{CA} , Ом	Обрыв провода	К.З. фазы	Обрыв фазы	Примечание
28	Y	$U_{\text{л}}=380$	50	$4-j3$	$6+j8$	-	-	-	С	В*	-	* – Без нулевого провода
29	Y	$U_{\phi}=127$	$5+j5$	$6-j6$	$-j10$	-	-	-	А	В*	-	
30	Y	$U_{\phi}=220$	10	$j10$	$-j20$	-	-	-	А	С	-	
31	Y	$U_{\phi}=220$	10	$6-j8$	$j20$	-	-	-	С	В	-	
32	Y	$U_{\text{л}}=380$	$6+j8$	$8+j6$	10	-	-	-	А	С	-	
33	Y	$U_{\phi}=220$	$-j10$	$j5$	$6+j8$	-	-	-	В	С*	-	
34	Δ	$U_{\text{л}}=220$	-	-	-	$10+j10$	$6+j6$	$8-j8$	С	-	BC	
35	Y	$U_{\phi}=127$	$3+j4$	$-j10$	20	-	-	-	В	С	-	
36	Δ	$U_{\text{л}}=220$	-	-	-	$8-j6$	10	$10+j10$	С	-	AB	
37	Y	$U_{\phi}=220$	$10+j6$	$16+j16$	$6-j8$	-	-	-	А	С	-	
38	Y	$U_{\text{л}}=380$	$5-j5$	$3+j4$	$6+j8$	-	-	-	В	А	-	
39	Y	$U_{\phi}=220$	$5+j5$	$3-j4$	$10+j8$	-	-	-	В	В*	-	
40	Δ	$U_{\text{л}}=400$	-	-	-	$9+j12$	$3-j4$	$6+j8$	В	-	AB	
41	Δ	$U_{\text{л}}=220$	-	-	-	$4-j3$	$8+j6$	$6+j8$	С	-	CA	
42	Δ	$U_{\text{л}}=127$	-	-	-	$3+j4$	$6-j8$	$4+j3$	В	-	AB	
43	Y	$U_{\phi}=127$	$6+j8$	$3+j4$	$8-j6$	-	-	-	А	С*	-	
44	Δ	$U_{\text{л}}=380$	-	-	-	$10+j10$	$10-j10$	$8+j6$	А	-	BC	
45	Y	$U_{\phi}=220$	$4-j3$	$6+j8$	$8+j6$	-	-	-	В	С*	-	
46	Y	$U_{\text{л}}=380$	$5+j5$	$6-j6$	$6+j8$	-	-	-	А	В*	-	
47	Y	$U_{\text{л}}=220$	10	$j10$	$-j20$	-	-	-	А	С	-	
48	Y	$U_{\text{л}}=220$	10	$6+j8$	$8+j6$	-	-	-	С	А	-	
49	Y	$U_{\text{л}}=380$	$6+j8$	$8+j6$	10	-	-	-	А	С	-	
50	Δ	$U_{\text{л}}=220$	-	-	-	$10+j10$	$6+j6$	$8+j8$	С	-	AB	

В результате изучения раздела “Трехфазные цепи” и выполнения задачи 1 контрольной работы №2 студенты должны :

1. Знать основные элементы трехфазных цепей; способы соединения фаз обмотки генератора и включения в трехфазную цепь приемников; способы изображения трехфазной симметричной системы ЭДС.

2. Понимать роль нейтрального (нулевого) провода; принципы построения потенциальных диаграмм; влияние рода и схемы включения нагрузки на величину тока в нейтральном (нулевом) проводе; схемы электроснабжения предприятий.

3. Уметь анализировать различные режимы симметричных и несимметричных цепей; читать схемы соединения трехфазных и однофазных цепей; предвидеть последствия коммутационных изменений в цепи на ее электрическое состояние.

Задача 2

Задача 2 посвящена расчету трехфазных цепей и анализу переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами при постоянной ЭДС источника питания.

При выполнении задачи 2 исходные расчетные данные к задачам определяют по двум последним цифрам зачетной книжки студента: по предпоследней цифре выбирают номер схемы, а по последней - номер варианта. Например, для зачетной книжки 96747 при решении этой работы выбирается схема 4 и числовые значения варианта в 7-й строке табл. 4.

В электрической цепи рис.4.1...4.0 в результате коммутации возникает переходный процесс. Параметры цепи для каждого варианта приведены в табл. 4.

Необходимо определить закон изменения тока $i_1(t)$ и построить его график.

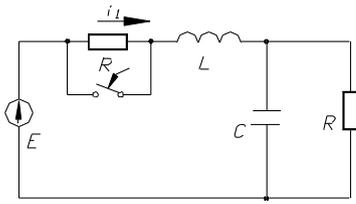


Рис. 4.1

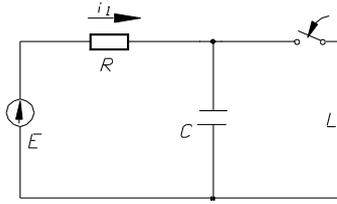


Рис. 4.2

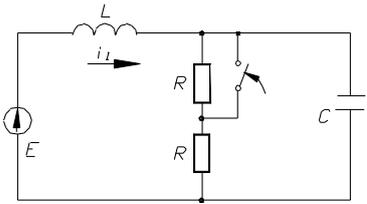


Рис. 4.3

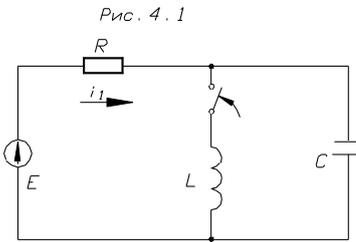


Рис. 4.4

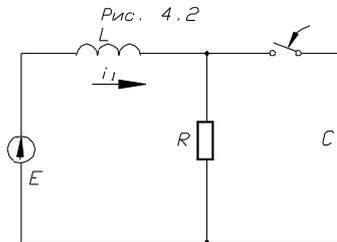


Рис. 4.5

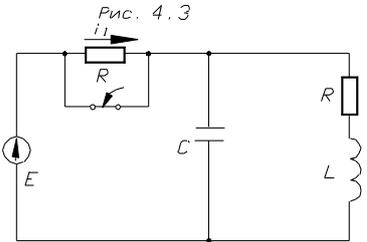


Рис. 4.6

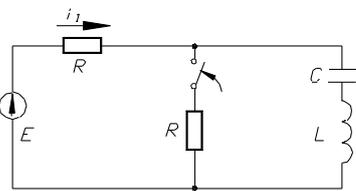


Рис. 4.7

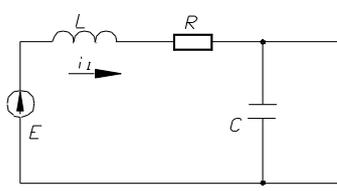


Рис. 4.8

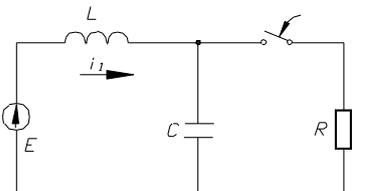


Рис. 4.9

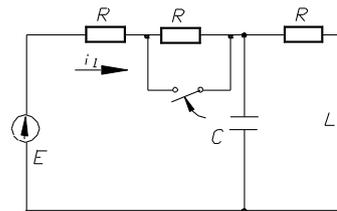


Рис. 4.10

Таблица 4

Номер строки	R , Ом	L , Гн	C , мкФ	E , В
1	10	0,100	100	115
2	8	0,020	31,3	120
3	6	0,060	83,3	125
4	15	0,025	80,6	110
5	48	0,060	200	110
6	8	0,050	100	120
7	5	0,100	120	120
8	10	0,080	100	110
9	15	0,100	40,2	120
0	10	0,050	50,5	125

Переходные процессы возникают в электрических цепях при переходе от одного установившегося режима к другому установившемуся режиму работы. Смена режимов происходит в результате коммутаций (включение, выключение, переключение, изменение параметров цепи и т.д.).

Различают следующие три метода расчета переходных процессов:

- классический метод;
- операторный метод;

- частотный метод.

Классический метод

Классический метод расчета переходных процессов сводится к следующему:

1. На схеме цепи после коммутации указывают положительные направления токов в ветвях. Затем на основании законов Кирхгофа составляют систему уравнений для мгновенных значений токов и напряжений переходного режима. Так как падение напряжения на сопротивлении $u_R = iR$, на индуктивности $u_L = L di/dt$ и на емкости $u_C = 1/C \int i dt$, то по законам Кирхгофа будет составлена система интегрально - дифференциальных уравнений заданной цепи.

2. Полученную систему уравнений решают относительно искомой функции (тока или напряжения). В результате получают неоднородные линейные дифференциальные уравнения, порядок которых равен числу независимых реактивных элементов в схеме. В случае двух реактивных элементов в последовательной цепи получают дифференциальное уравнение.

$$a \frac{d^2 i}{dt^2} + b \frac{di}{dt} + ci = f(u),$$

где a, b, c - коэффициенты, зависящие от параметров цепи;

$f(u)$ - неоднородный член уравнения, зависящий от величины и формы приложенного к цепи напряжения.

3. Решают неоднородные дифференциальные уравнения, в результате чего находят искомый ток или напряжение переходного процесса.

Решение дифференциального уравнения складывается из **общего** решения однородной части этого уравнения (правая часть равна нулю) и **частного** решения неоднородного уравнения, определяемого видом функции $f(u)$.

Частное решение выражает **принужденный** режим, задаваемый источниками электрической энергии, а **общее** решение - **свободный** режим. Таким образом ток переходного процесса $i = i_{np} + i_{св}$, а напряжение $u = u_{np} + u_{св}$.

Принужденные составляющие токов и напряжений совпадают с установившимися значениями этих величин после окончания переходных процессов.

Характер переходного процесса зависит от параметров цепи и определяется корнями характеристического уравнения $ap^2 + bp + c = 0$.

Если корни вещественные, отрицательные и разные ($p_1 < 0; p_2 < 0$), то режим будет аperiodическим, а свободная составляющая тока запишется в виде:

$$i_{св} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

Если корни комплексные и сопряженные ($p_1 = -\delta + j\omega_1; p_2 = -\delta - j\omega_1$), то в цепи будет колебательный режим, а свободная составляющая тока будет

$$i_{св} = A e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \gamma).$$

При наличии равных отрицательных корней ($p_1 = p_2 = p < 0$) возникает критический режим, при котором свободный ток запишется в виде:

$$i_{св} = (A_1 + A_2 t) e^{p t}.$$

Для определения постоянных интегрирования $A; A_1; A_2; \gamma$ необходимо определить ток и его производную в момент коммутации ($t=0$). Для этого сначала определяют начальные значения тока в индуктивном элементе и напряжения на емкостных элементах путем расчета цепи до коммутации и использования законов коммутации. Подставляя эти значения в исходные дифференциаль-

ные уравнения, а также полагая $t=0$, определяют начальные значения свободных составляющих токов.

Производная от тока в индуктивности находится непосредственно из уравнения, написанного для контура, в который входит ветвь с индуктивностью.

Производные от токов в других ветвях схемы определяются из уравнения, в котором нет ветви с индуктивностью. После его дифференцирования и перехода к $t=0$, причем напряжение на конденсаторе нужно писать в форме интеграла:

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt ,$$

что дает

$$\left. \frac{du_c}{dt} \right|_{t=0} = \frac{i_c(0)}{C} .$$

В некоторых случаях нужно использовать и первый закон Кирхгофа для производных от токов

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} .$$

Корни характеристического уравнения находятся из входного сопротивления в операторной форме $Z(p)=0$.

Операторный метод

Операторный метод расчета переходных процессов заключается в том, что функция $f(t)$ (обычно ток $i(t)$ или напряжения $u(t)$ вещественного переменного t (времени), называемая **оригиналом**, заменяется соответствующей функцией $F(p)$ комплексного переменного p , называемой **изображением**.

Указанные функции связаны соотношением

$$u_c = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt ,$$

которое называется **прямым преобразованием Лапласа**. Сокращенно это записывается как

$$F(p) \doteq f(t) .$$

При переходе к изображению дифференциальные и интегральные уравнения преобразуются в алгебраические.

Постоянное напряжение U будет записываться в операторной форме как U/p т.е. $U(p)=U/p$.

Изображение гармонического напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$, будет

$$U(p) = U_m = \frac{p \sin \varphi_u + \omega \cos \varphi_u}{p^2 + \omega^2}$$

Пользуясь комплексными числами, гармоническое напряжение

$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$ можно представить как мнимую часть комплекса $U_m e^{j(\omega t + \varphi_u)}$, т. е.

$$u = J_m [U_m e^{j(\omega t + \varphi_u)}] .$$

В этом случае изображение гармонического напряжения значительно упрощается и имеет вид

$$U(p) = \frac{U_m e^{j\varphi_u}}{p - j\omega}$$

Операторные сопротивления цепей записываются так же, как и сопротивления для тех же цепей в комплексной форме, в которых $j\omega$ заменено на p .

Так для цепи, состоящей из последовательно включенных элементов R , L и C , операторное сопротивление имеет вид

$$Z(p) = R + pL + \frac{1}{pC}.$$

Напряжения на сопротивлении $U_R(p)$, индуктивности $U_L(p)$ и емкости $U_C(p)$ в операторной форме

$$\begin{aligned} U_R(p) &= R I(p); \\ U_L &= p L I(p) - L i(0); \\ U_C(p) &= \frac{I(p)}{pC} + \frac{U_C(0)}{p}, \end{aligned}$$

где $i(0)$ и $U_C(0)$ - начальные значения тока в индуктивности и напряжения на емкости.

Уравнения для изображений тока и напряжения любой цепи могут быть получены по законам Ома и Кирхгофа, написанных для операторных схем замещения.

Полученную систему уравнений в операторной форме решают относительно изображения искомого тока или напряжения. В общем случае выражение для токов любой ветви в операторной форме имеет вид

$$I(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)},$$

где $F_1(p)$ и $F_2(p)$ - алгебраические многочлены, степени которых соответственно m и n , причем $m < n$.

Переход от изображения к оригиналу осуществляется при помощи теоремы разложения:

$$i(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} \cdot e^{p_k t},$$

где p_k - корни уравнения $F_2(p) = 0$;

n - число корней;

$F_1(p_k)$ - значение функции при $p = p_k$;

$F_2'(p_k)$ - значение производной функции $F_2(p)$ при $p = p_k$.

Для случая подключения источника постоянного напряжения к пассивной цепи с входным операторным сопротивлением $Z(p)$ на основании теоремы разложения получена более простая расчетная формула, называемая формулой включения

$$i(t) = \frac{U}{Z(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{U}{p_k Z'(p_k)} e^{p_k t},$$

где p_k - корни уравнения $Z(p) = 0$.

После изучения раздела “Переходные процессы в линейных электрических цепях” и выполнения задачи 2 студенты должны:

1. Знать содержание терминов: переходный процесс; принужденные и свободные составляющие токов и напряжений; начальные значения величин; докоммутационные и послекоммутационные начальные условия; независимые и зависимые (после коммутационные) начальные условия; нулевые и ненулевые начальные условия.

2. Понимать особенности электромагнитных процессов при переходных процессах и их влияние на работу электрической цепи; опасные перенапряжения при размыканиях ветвей в цепях, содержащих индуктивность.

3. Уметь составлять уравнения для свободных токов и напряжений; производить алгебраизацию системы уравнений для свободных токов; составить характеристическое уравнение системы; производить расчет переходных процессов электрической цепи классическим и операторным методами; переходить от изображения к функции времени.

4. Примеры расчета электрических цепей постоянного и переменного тока.

Пример 1

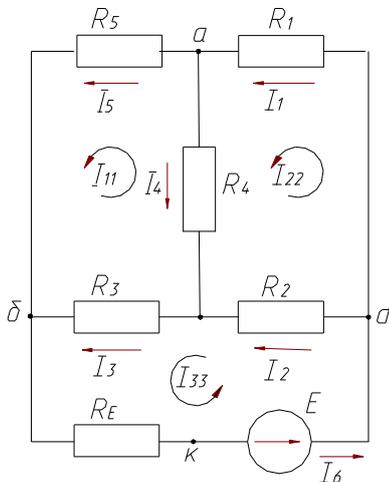


Рис. 1.1 Расчетная схема

Дано: $E=23$ В;
 $R_E=200$ Ом;
 $R_1=730$ Ом;
 $R_2=R_3=500$ Ом;
 $R_4=1000$ Ом;
 $R_5=319$ Ом;
Требуется:

1. Составить систему уравнений, необходимых для нахождения токов по первому и второму законам Кирхгофа (рис. 1.1).
2. Найти все токи в ветвях, пользуясь методом контурных токов.
3. Проверить правильность решения, применив метод узлового напряжения. Для этого необходимо предварительно упростить схему, заменив треугольник сопротивлений R_1 , R_2 и R_4 эквивалентной звездой. Начертить расчетную схему с эквивалентной звездой и показать на ней токи.
4. Определить ток в резисторе R_5 методом эквивалентного генератора.
5. Составить баланс мощностей для заданной схемы (рис. 1.1).
6. Построить в масштабе потенциальную диаграмму для внешнего контура.
7. Определить напряжение между точками d и b ($U_{db}=?$).

Решение

Произвольно наносятся положительные направления токов в каждой ветви. В нашем случае требуется определить токи I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 и I_6 и напряжение между точками b и d ($U_{bd}=?$).

Для нахождения токов нужно составить шесть уравнений, используя 1-й и 2-й законы Кирхгофа.

Число уравнений, которые нужно составить по 1-ому закону Кирхгофа

$$n_I = y - 1 = 4 - 1 = 3,$$

где y - число узлов в расчетной схеме (рис. 1.1), $y = 4$ (a, b, c и d).

Число уравнений, которые необходимо составить по 2-ому закону Кирхгофа

$$n_{II} = b - n_I = 6 - 3 = 3,$$

где b - число ветвей в расчетной схеме, $b=6$.

1. Запишем эти шесть уравнений для нахождения токов в шести ветвях с учетом принятого направления токов и обхода контуров. При этом произведение $I_k R_k$ считается положительным, если направление тока и сопротивлений совпадает с выбранным направлением обхода и наоборот.

ЭДС в уравнении берется со знаком плюс, если ее направление совпадает с направлением обхода контура.

$$I_1 - I_5 - I_4 = 0$$

или

$$I_1 = I_5 + I_4$$

$$I_5 + I_3 - I_6 = 0$$

$$I_6 = I_5 + I_3$$

$$I_6 - I_2 - I_1 = 0$$

$$I_1 = I_6 - I_2$$

$$I_3 R_3 - I_5 R_5 + I_4 R_4 = 0$$

или

$$500I_3 - 319I_5 + 1000I_4 = 0$$

$$I_4 R_4 - I_1 R_1 + I_2 R_2 = 0$$

$$1000I_4 - 730I_1 + 500I_2 = 0$$

$$I_6 R_E + I_2 R_2 + I_3 R_3 = E$$

$$200I_6 + 500I_2 + 500I_3 = 23$$

2. В каждом независимом контуре назначаем контурные токи I_{11} , I_{22} и I_{33} и их положительное направление (рис. 1.1).

Составим три уравнения по 2-ому закону Кирхгофа (по числу контуров) относительно контурных токов I_{11} , I_{22} и I_{33} .

$$\begin{aligned} I_{11}(R_3+R_5+R_4) - I_{33}R_3 - I_{22}R_4 &= 0 & \text{или} & & 1819I_{11} - 500I_{33} - 1000I_{22} &= 0 \\ I_{22}(R_1+R_2+R_4) - I_{11}R_4 - I_{33}R_2 &= 0 & & & 2230I_{22} - 1000I_{11} - 500I_{33} &= 0 \\ I_{33}(R_E+R_3+R_2) - I_{11}R_3 - I_{22}R_2 &= E & & & 1200I_{33} - 500I_{11} - 500I_{22} &= 23 \end{aligned}$$

Решая эту систему уравнений, имеем:

$$I_{11} = 0,01714 \text{ A}; \quad I_{22} = 0,01498 \text{ A}; \quad I_{33} = 0,03255 \text{ A}.$$

ФАКТИЧЕСКИЕ ТОКИ В ВЕТВЯХ

$$\begin{aligned} I_5 &= I_{11} = 0,01714 \text{ A}; & I_2 &= I_{33} - I_{22} = 0,03255 - 0,01498 = 0,01757 \text{ A}; \\ I_1 &= I_{22} = 0,01498 \text{ A}; & I_4 &= I_{22} - I_{11} = 0,01498 - 0,01714 = -0,00216 \text{ A}; \\ I_6 &= I_{33} = 0,03255 \text{ A}; & I_3 &= I_{33} - I_{11} = 0,03255 - 0,01714 = 0,01543 \text{ A}. \end{aligned}$$

3. Проверим правильность расчета методом двух узлов, для чего предварительно заменим треугольник сопротивлений R_1 , R_4 и R_2 эквивалентной звездой.

При этом схема рис. 1.2 преобразуется в схему рис. 1.3.

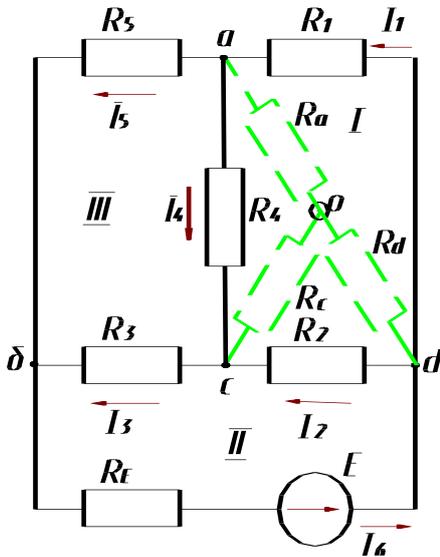


Рис. 1.2. Схема для определения сопротивлений эквивалентной звезды

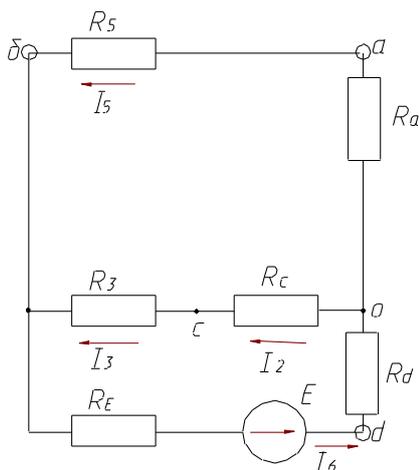


Рис. 1.3. Эквивалентная схема

Сопротивления лучей эквивалентной звезды (рис. 1.2)

$$R_d = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_4} = \frac{730 \cdot 500}{730 + 500 + 1000} = 163,7 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_4 + R_1} = \frac{500 \cdot 1000}{500 + 1000 + 730} = 224,2 \text{ Ом}$$

$$R_a = \frac{R_4 \cdot R_1}{R_1 + R_4 + R_2} = \frac{1000 \cdot 730}{1000 + 730 + 500} = 327,4 \text{ Ом}.$$

Находим узловое напряжение U_{ob} (рис. 1.3)

$$\begin{aligned} U_{ob} &= \frac{E \cdot \frac{1}{R_E + R_d}}{\frac{1}{R_a + R_5} + \frac{1}{R_c + R_3} + \frac{1}{R_d + R_E}} = \\ &= \frac{23 \cdot \frac{1}{200 + 163,7}}{\frac{1}{319 + 327,4} + \frac{1}{500 + 224,2} + \frac{1}{200 + 163,7}} = 11,07 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Находим силу тока в ветвях

$$I_5 = \frac{U_{ob}}{R_a + R_5} = \frac{11,07}{327,4 + 319} = \frac{11,07}{646,4} = 0,01714 \text{ A}$$

$$I_6 = \frac{E - U_{ob}}{R_d + R_E} = \frac{23 - 11,07}{163,7 + 200} = \frac{11,93}{363,7} = 0,0326 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U_{ob}}{R_c + R_3} = \frac{11,07}{224,2 + 500} = \frac{11,07}{724,2} = 0,0153 \text{ A}$$

Для нахождения токов I_2 , I_1 и I_4 вернемся к рис. 1.2.

Из контура III имеем $I_5 R_5 - I_3 R_3 - I_4 R_4 = 0$.

$$\text{ОТСЮДА} \quad I_4 = \frac{I_5 R_5 - I_3 R_3}{R_4} = \frac{0,01714 \cdot 319 - 0,0153 \cdot 500}{1000} = -0,00218 \text{ A.}$$

Из контура I имеем $I_1 - I_4 - I_5 = 0$; $I_4 + I_2 - I_3 = 0$.

Отсюда $I_1 = I_4 + I_5 = -0,00218 + 0,01714 = 0,01496 \text{ A}$,

$I_2 = I_3 - I_4 = 0,0153 - (-0,00218) = 0,0175 \text{ A}$.

А; $I_3 = 0,0153 \text{ A}$; $I_4 = -0,00218 \text{ A}$; $I_5 = 0,01714 \text{ A}$; $I_6 = 0,0326 \text{ A}$;
 Ответ. $I_1 = 0,01496 \text{ A}$; $I_2 = 0,0175 \text{ A}$ Рис. 1.5. Схема эквивалентного генератора

4. Определяем силу тока в резисторе R_5 методом эквивалентного генератора (рис. 1.5)

$$I_5 = \frac{U_{abxx}}{R_5 + R_{ex}} = \frac{E_{экв}}{R_5 + R_{экв}},$$

где U_{abxx} - напряжение холостого хода относительно зажимов a и b ;

$R_{ex} = R_{экв}$ - входное эквивалентное сопротивление схемы относительно зажимов a и b .

Для нахождения $U_{abxx} = E_{экв}$ расчетную схему рис. 1.1 представим в схеме, изображенной на рис. 1.4.

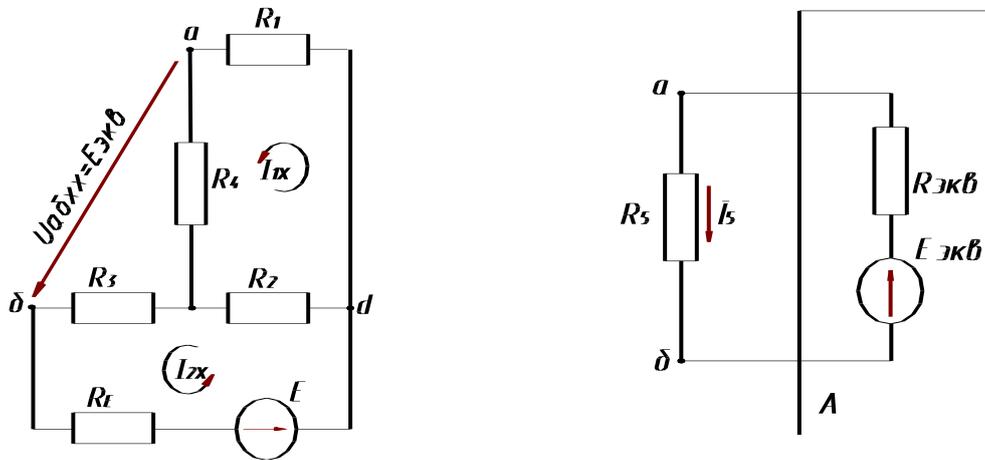


Рис. 1.4. Схема для определения напряжения холостого хода

Из контура $abca$ имеем $U_{abxx} - I_{2X} R_3 - I_{1X} R_4 =$

0.

ОТСЮДА ТОКИ I_{1X} И I_{2X} , ИСПОЛЬЗУЯ МЕТОД КОНТУРНЫХ ТОКОВ, ОПРЕДЕЛЯЮТСЯ:

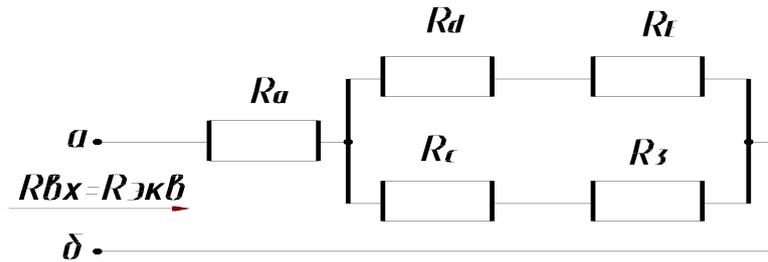
$$\begin{aligned} I_{1X}(R_1 + R_4 + R_2) - I_{2X} R_2 &= 0 & I_{1X}(730 + 100 + 500) - 500 I_{2X} &= 0 & 2230 I_{1X} - 500 I_{2X} &= 0 \\ -I_{1X} R_2 + I_{2X}(R_2 + R_3 + R_E) &= E & -500 I_{1X} + I_{2X}(500 + 500 + 200) &= 23 & -500 I_{1X} + 1200 I_{2X} &= 23 \end{aligned}$$

$$I_{1X} = \frac{500 I_{2X}}{2230}; \quad 1200 I_{2X} - \frac{500 I_{2X}}{2230} = 23$$

$$I_{2X} = 0,02114 \text{ A}; \quad I_{1X} = 0,00474 \text{ A.}$$

Тогда $U_{abxx} = I_{2X} R_3 + I_{1X} R_4 = 0,02114 \cdot 500 + 0,00474 \cdot 1000 = 15,311 \text{ В}$. $U_{abxx} = 15,311 \text{ В}$.

Рис. 1.6. Схема для определения входного сопротивления



Для определения $R_{\text{вх}}=R_{\text{экв}}$ анализируем цепь без ЭДС. При этом исходная схема (рис.1.3) преобразуется в схему, изображенную на рис. 1.6.

$$R_{\text{вх}}=R_{\text{экв}}=R_a + \frac{(R_d + R_E) \cdot (R_c + R_3)}{R_d + R_E + R_c + R_3} = 327,4 + \frac{(163,7 + 200) \cdot (224,2 + 500)}{163,7 + 200 + 224,2 + 500} = 569,456 \text{ Ом.}$$

Ток через резистор R_5
$$I_5 = \frac{U_{\text{абхх}}}{R_5 + R_{\text{вх}}} = \frac{15,31}{319 + 569,456} = 0,0712 \text{ А.}$$

5. Составим энергетический баланс мощностей

$$EI_6 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_E;$$

$$23 \cdot 0,0326 = (0,01496)^2 \cdot 730 + (0,175)^2 \cdot 500 + (0,0153)^2 \cdot 500 + (-0,00218)^2 \cdot 1000 + (0,01714)^2 \cdot 319 + (0,0326)^2 \cdot 200, \text{ т. е. } 0,7498 \approx 0,7486.$$

6. Напряжение между точками d и b (рис. 1.1) определяем из выражения

$$U_{db} - I_3 R_3 - I_2 R_2 = 0.$$

$$U_{db} = I_3 R_3 + I_2 R_2 = 0,0153 \cdot 500 + 0,0175 \cdot 500 = 16,4 \text{ В}$$

7. Для построения потенциальной диаграммы для внешнего контура необходимо знать потенциалы всех точек по контуру (рис. 1.1)

$$\varphi_a = 0$$

$$\varphi_b = \varphi_a - I_5 R_5 = 0 - 0,01714 \cdot 319 = -5,467 \text{ В}$$

$$\varphi_k = \varphi_b - I_6 R_E = -5,467 - 0,03255 \cdot 200 = -11,98 \text{ В}$$

$$\varphi_d = \varphi_k + E = -11,98 + 23 \approx 11,02 \text{ В}$$

$$\varphi_a = \varphi_d - I_1 R_1 = 11,02 - 0,01498 \cdot 730 \approx 0$$

Потенциальная диаграмма внешнего контура цепи (рис. 1.1) представлена на рис. 1.7

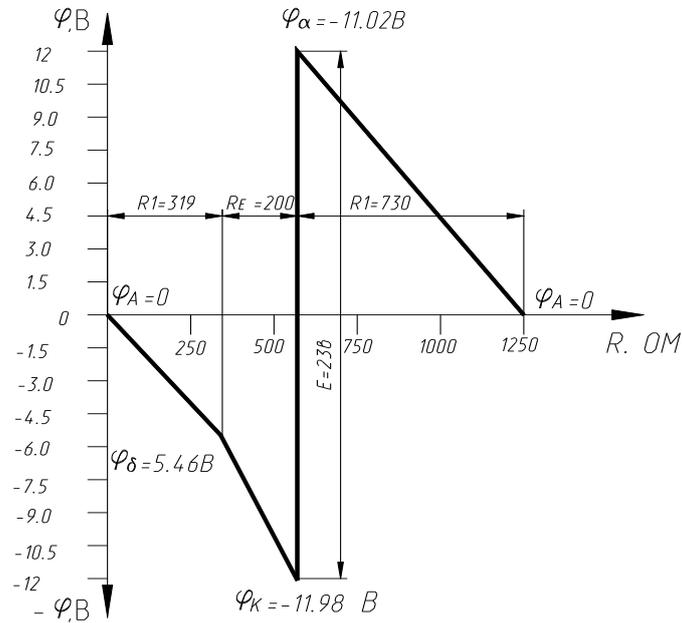


Рис. 1.7. Потенциальная диаграмма внешнего контура цепи (рис. 1.1)

Пример 2

Рассчитать электрическую цепь (рис. 2.1) при синусоидальных токах частотой 50 Гц. Составить баланс мощностей и построить векторную диаграмму токов и напряжений, если известно:

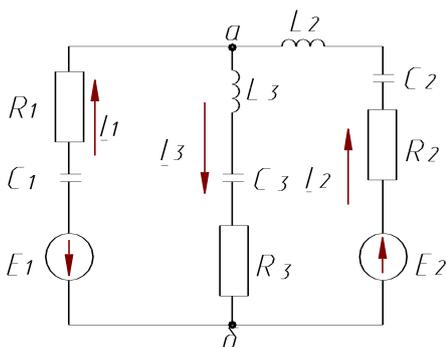


Рис. 2.1. Расчетная схема

$E_1 = 35 \text{ В}; E_2 = 210 \text{ В};$
 $R_1 = 10 \text{ Ом}; R_2 = 5 \text{ Ом};$
 $R_3 = 6 \text{ Ом};$
 $L_2 = 31,847 \text{ мГн};$
 $L_3 = 28,662 \text{ мГн};$
 $C_1 = 318,47 \text{ мкФ};$
 $C_2 = 212,314 \text{ мкФ};$
 $C_3 = 3184,7 \text{ мкФ}.$
 Найти: $I_1; I_2; I_3.$

Пример рассчитываем методом двух узлов

Индуктивные и емкостные сопротивления ветвей

$$X_{L1} = \omega L_2 = 2\pi f L_2 = 314 \cdot 31,847 \cdot 10^{-3} = 10 \text{ Ом};$$

$$X_{L3} = \omega L_3 = 314 \cdot 28,662 \cdot 10^{-3} = 9 \text{ Ом};$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{314 \cdot 318,47 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ Ом};$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{314 \cdot 212,314 \cdot 10^{-6}} = 15 \text{ Ом};$$

$$X_{C3} = \frac{1}{\omega C_3} = \frac{1}{314 \cdot 3184,7 \cdot 10^{-6}} = 1 \text{ Ом.}$$

КОМПЛЕКСЫ ПОЛНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ВЕТВЕЙ

$$\underline{Z}_1 = R_1 - jX_{C1} = (10 - j10) = 14,14 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j(X_{L2} - X_{C2}) = 5 + j(10 - 15) = (5 - j5) = 7,06 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j(X_{L3} - X_{C3}) = 6 + j(9 - 1) = (6 + j8) = 10 \cdot e^{j53^\circ} \text{ Ом.}$$

КОМПЛЕКСЫ ПОЛНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ ВЕТВЕЙ

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{14,14 \cdot e^{-j45^\circ}} = 0,07 e^{j45^\circ} = (0,05 + j0,05) \text{ См;}$$

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{7,06 \cdot e^{-j45^\circ}} = 0,141 e^{j45^\circ} = (0,1 + j0,1) \text{ См;}$$

$$\underline{Y}_3 = \frac{1}{\underline{Z}_3} = \frac{1}{10 \cdot e^{j53^\circ}} = 0,1 e^{-j53^\circ} = (0,06 - j0,08) \text{ См.}$$

КОМПЛЕКС НАПРЯЖЕНИЙ МЕЖДУ УЗЛАМИ А И Б

$$\dot{U}_{ab} = \frac{-\dot{E}_1 \underline{Y}_1 + \dot{E}_2 \underline{Y}_2}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} = \frac{-35(0,05 + j0,05) + 210(0,1 + j0,1)}{(0,05 + j0,05) + (0,1 + j0,1) + (0,06 - j0,08)} = 123,03 e^{j26^\circ 30'} = (110,1 + j54,9) \text{ В.}$$

Комплексы токов в ветвях

$$\dot{I}_1 = \frac{-\dot{E}_1 - \dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_1} = \frac{-35 - (110,1 + j54,9)}{14,14 e^{j45^\circ}} = 10,97 e^{j245^\circ 40'} = 10,97 e^{-j114^\circ 20'} = (-4,51 - j10) \text{ А;}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2 - \dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_2} = \frac{210 - (110,1 + j54,9)}{7,06 e^{-j45^\circ}} = 16,14 e^{j16^\circ 10'} = (15,5 + j4,49) \text{ А;}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_3} = \frac{123,03 \cdot e^{j26^\circ 30'}}{10 \cdot e^{j53^\circ}} = 12,3 e^{-j26^\circ 40'} = (10,99 - j5,51) \text{ А.}$$

Проверка: $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_3; \quad (-4,51 - j10) + (15,5 + j4,49) = (10,99 - j5,51).$

ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

$$\dot{U}_{R1} = \dot{I}_1 \cdot R_1 = 10,973 \cdot e^{j245^\circ 40'} \cdot 10 = 109,73 \cdot e^{j245^\circ 40'} = (-45,13 - j100) \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{R2} = \dot{I}_2 \cdot R_2 = 16,14 \cdot e^{j16^\circ 10'} \cdot 5 = 80,707 \cdot e^{j16^\circ 10'} = (7,75 + j22,43) \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{R3} = \dot{I}_3 \cdot R_3 = 12,3 e^{-j26^\circ 40'} \cdot 6 = 73,78 e^{-j26^\circ 40'} = (65,95 - j33,09) \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{L2} = \dot{I}_2 \cdot (jX_{L2}) = 16,14 \cdot e^{j16^\circ 10'} \cdot 10 \cdot e^{j90^\circ} = 161,5 \cdot e^{j105^\circ 10'} = (-44,88 + j155,13) \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{L3} = \dot{I}_3 \cdot (jX_{L3}) = 12,3 \cdot e^{-j26^\circ 40'} \cdot 9 \cdot e^{j90^\circ} = 110,73 \cdot e^{j63^\circ 24'} = (49,66 + j98,97) \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{C1} = \dot{I}_1 \cdot (-jX_{C1}) = 10,97 \cdot e^{j245^\circ 40'} \cdot 10 \cdot e^{-j90^\circ} = 109,67 \cdot e^{j155^\circ 40'} = (-99,96 + j45,11) \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{C2} = \dot{I}_2 \cdot (-jX_{C2}) = 16,14 \cdot e^{j16^\circ 10'} \cdot 15 \cdot e^{-j90^\circ} = 242 \cdot e^{-j73^\circ 50'} = (67,26 - j232,46) \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{C3} = \dot{I}_3 \cdot (-jX_{C3}) = 12,3 \cdot e^{-j26^\circ 10'} \cdot 1 \cdot e^{-j90^\circ} = 12,3 \cdot e^{-j116^\circ 10'} = (-5,51 - j10,98) \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{Z1} = \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 = 10,97 \cdot e^{j245^\circ 40'} \cdot 14,14 \cdot e^{-j45^\circ} = 155,14 \cdot e^{j200^\circ 40'} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{Z2} = \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 = 16,14 \cdot e^{j16^\circ 10'} \cdot 7,06 \cdot e^{-j45^\circ} = 114 \cdot e^{-j28^\circ 50'} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{Z3} = \dot{I}_3 \cdot \underline{Z}_3 = \dot{U}_{ab} = 12,3 \cdot e^{-j26^\circ 40'} \cdot 10 \cdot e^{j53^\circ} = 123 \cdot e^{j26^\circ 30'} \text{ В.}$$

Составляем энергетический баланс мощностей

$$\sum \dot{E}_i \cdot I_i^* = \sum \dot{I}_i^2 R_i + j \sum \dot{I}_2^2 X_i$$

$$\begin{aligned}\sum \dot{E}_i \cdot I_i^* &= -\dot{E}_1 I_1^* + \dot{E}_2 I_2^* = -35 \cdot 10,97 \cdot e^{-j245^\circ 40'} + 210 \cdot 16,14 \cdot e^{-j16^\circ 10'} = -383,95 \cdot e^{-j245^\circ 40'} + 3389,4 \cdot e^{-j16^\circ 10'} = \\ &= 383,95 \cdot e^{-j65^\circ 40'} + 3389,4 \cdot e^{-j16^\circ 10'} = 158 - j349,9 + 3254,82 - j945,61 = (3412,82 - j1295,5) \text{ ВА}; \\ \sum I_i^2 R_i &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 = 10,97^2 \cdot 10 + 16,14^2 \cdot 5 + 12,32^2 \cdot 6 = 1203,41 + 1302,5 + 907,74 = \\ &= 3413,65 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}j \sum I_{Li}^2 X_{Li} + j \sum I_{Ci}^2 X_{Ci} &= I_2^2 (jX_{L2}) + I_3^2 (jX_{L3}) + I_1^2 (-jX_{C1}) + I_2^2 (-X_{C2}) + I_3^2 (-jX_{C3}) \cdot \\ &= -j10,97^2 \cdot 10 - j16,14^2 \cdot 15 - j12,32^2 \cdot 1 = j2604,5 + j1361,61 - j1203,4 - j3907,5 - j151,3 = \\ &= j3966,61 - j5262,2 = -j1295,6 \text{ ВА}.\end{aligned}$$

Отсюда $(3412,82 - j1295,5) \approx (3413,65 - j1295,6) \text{ ВА}$, т.е. токи найдены правильно.

Строим векторную диаграмму токов и напряжений (рис.2.2), для чего необходимо выбрать масштаб напряжений и токов. Принимаем $m_u = 2 \text{ В/мм}$ и $m_I = 0,1 \text{ А/мм}$

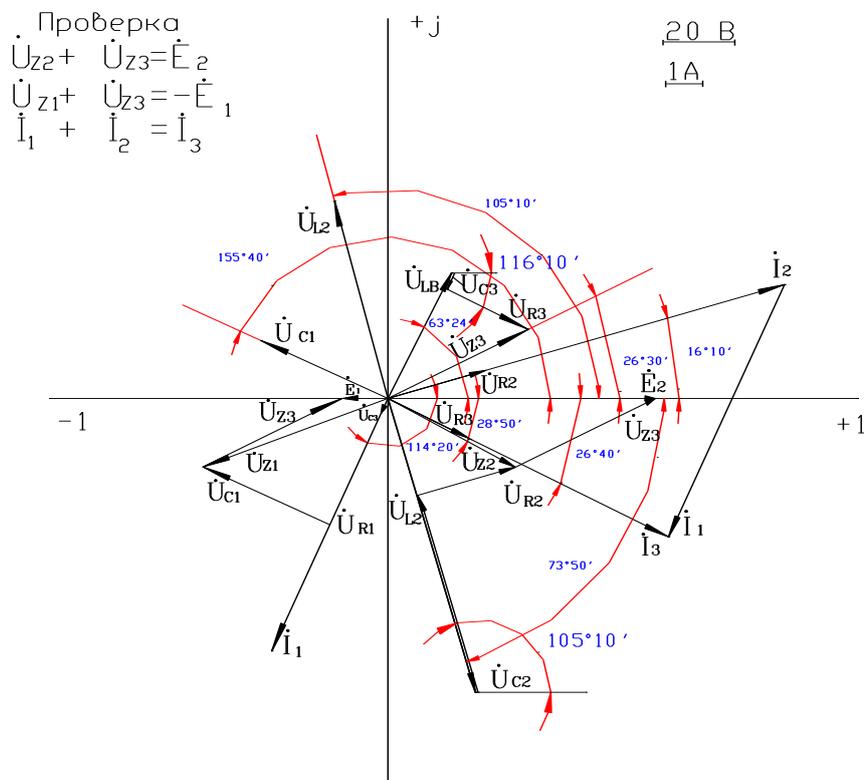


Рис.2.2 Векторная диаграмма токов и напряжений

Пример 3

Приемник, обмотки которого соединены в “звезду” без нулевого провода, питается от сети напряжением 208 В. Известны сопротивления фаз обмоток приемника:

$$\underline{Z}_A = (8 + j6) \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_B = (8 - j6) \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_C = 25 \text{ Ом}.$$

Требуется определить:

- фазные и линейные токи приемника;

- активную, реактивную и полную мощности приемника;
- коэффициент мощности приемника;
- построить векторные диаграммы токов и напряжений;
- рассчитать параметры цепи при обрыве провода C , построить векторные диаграммы токов и напряжений;
- рассчитать параметры цепи и построить векторные диаграммы токов и напряжений при коротком замыкании фазы A (рис.3.1)

Нормальный режим работы

Комплексы напряжений фаз генератора

$$\dot{U}_A = \frac{\dot{U}_Л}{\sqrt{3}} \cdot e^{j0} = \frac{208}{\sqrt{3}} \cdot 1 = 120 \text{ В};$$

$$\dot{U}_B = \frac{\dot{U}_Л}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j120} = 120 \cdot e^{-j120} = (-60 - j104) \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = \frac{\dot{U}_Л}{\sqrt{3}} \cdot e^{j120} = (-60 + j104) \text{ В}.$$

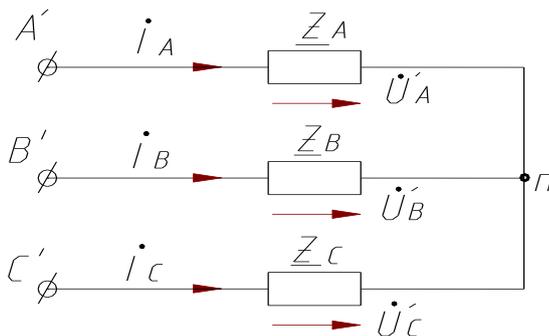
Комплексы проводимостей фаз генератора

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A} = \frac{1}{(8 + j6)} = \frac{1}{10 \cdot e^{j36^\circ 50'}} = 0,1 \cdot e^{-j36^\circ 50'} = (0,08 - j0,06) \text{ См};$$

$$\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B} = \frac{1}{(8 - j6)} = 0,1 \cdot e^{j36^\circ 50'} = (0,08 + j0,06) \text{ См};$$

$$\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C} = \frac{1}{25} = 0,04 \text{ См}.$$

Комплекс напряжения смещения



$$\begin{aligned} \dot{U}_{Nn} &= \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \\ &= \frac{120(0,08 - j0,06) + (-60 - j104)(0,08 + j0,06) + (-60 + j104)0,04}{(0,08 - j0,06) + (0,08 + j0,06) + 0,04} = \\ &= \frac{8,64 - j14,96}{0,2} = (43,2 - j74,8) = 86,4 \cdot e^{-j60} \text{ В}. \end{aligned}$$

Комплексы фазных напряжений приемника.

$$\begin{aligned} \dot{U}'_A &= \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn} = 120 - (43,2 - j74,8) = \\ &= (76,8 + j74,8) = 107,2 \cdot e^{j44^\circ 15'} \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn} = (-60 - j104) - (43,2 - j74,8) = (-103,2 - j29,2) = 107,2 \cdot e^{-j163^\circ 45'} = 107,2 \cdot e^{j196^\circ 15'}$$

В;

$$\dot{U}'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} = (-60 + j104) - (43,2 - j74,8) = (-103,2 + j178,8) = 206,5 \cdot e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Комплексы токов приемника

$$\dot{I}'_A = \dot{I}_A = \dot{U}'_A \cdot \underline{Y}_A = 107,2 \cdot e^{j44^\circ 15'} \cdot 0,1 \cdot e^{-j36^\circ 50'} = 10,72 \cdot e^{j7^\circ 25'} = (10,63 + j1,38) \text{ A};$$

$$\dot{I}'_B = \dot{I}_B = \dot{U}'_B \cdot \underline{Y}_B = 107,2 \cdot e^{j196^\circ 15'} \cdot 0,1 \cdot e^{j36^\circ 50'} = 10,72 \cdot e^{j233^\circ 5'} = (-6,5 - j8,53) \text{ A};$$

$$\dot{I}'_C = \dot{I}_C = \dot{U}'_C \cdot \underline{Y}_C = 206,5 \cdot e^{j120^\circ} \cdot 0,04 = 8,26 \cdot e^{j120^\circ} = (-4,13 + j7,15) \text{ A}.$$

$$\text{Проверка: } \dot{I}'_A + \dot{I}'_B + \dot{I}'_C = 0$$

$$(10,63 + j1,38) + (-6,5 - j8,53) + (-4,13 + j7,15) = 0 + j0 = 0.$$

Строим векторную диаграмму токов и напряжений (рис.3.2), приняв масштабы для тока $m_I = 0,2 \text{ A / мм}$ и напряжения $m_U = 2 \text{ В / мм}$.

Обрыв провода С

При обрыве провода С имеем $Y_C = 0$; $I_C = 0$.

КОМПЛЕКС НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Nn} &= \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B} = \\ &= \frac{120(0,08 - j0,06) + (-60 - j104)(0,08 + j0,06)}{(0,08 - j0,06) + (0,08 + j0,06)} = \frac{11,04 - j19,12}{0,16} = (69 - j119,5) = 138 \cdot e^{-j60^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

Комплексы фазных напряжений приемника

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn} = 120 - (69 - j119,5) = (51 + j119,5) = 129,9 \cdot e^{j66^\circ 50'} \text{ В};$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn} = (-60 - j104) - (69 - j119,5) = (-129 + j15,5) = 129,9 \cdot e^{j173^\circ 10'} \text{ В};$$

$$\dot{U}'_C = \dot{I}'_C \underline{Z}_C = 0 \cdot 25 = 0.$$

Комплексы фазных токов приемника

$$\dot{I}'_A = \dot{I}_A = \dot{U}'_A \cdot \underline{Y}_A = 129,9 \cdot e^{j66^\circ 50'} \cdot 0,1 \cdot e^{-j36^\circ 50'} = 12,99 \cdot e^{j30^\circ} = (11,23 + j6,5) \text{ A};$$

$$\dot{I}'_B = \dot{I}_B = \dot{U}'_B \cdot \underline{Y}_B = 129,9 \cdot e^{j173^\circ 10'} \cdot 0,1 \cdot e^{j36^\circ 50'} = 12,99 \cdot e^{j210^\circ} = (-11,23 - j6,5) \text{ A};$$

$$\dot{I}'_C = \dot{I}_C = 0.$$

Строим векторную диаграмму токов и напряжений. Принимаем масштаб токов $m_I = 0,4 \text{ A/мм}$ и напряжения $m_U = 5 \text{ В/мм}$. (рис.3.3).

Короткое замыкание фазы А

При коротком замыкании фазы А проводимость этой фазы $Y_A = \infty$.

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \frac{\underline{Y}_A \left(\dot{U}_A \cdot 1 + \dot{U}_B \frac{\underline{Y}_B}{\underline{Y}_A} + \dot{U}_C \frac{\underline{Y}_C}{\underline{Y}_A} \right)}{\underline{Y}_A \left(1 + \frac{\underline{Y}_B}{\underline{Y}_A} + \frac{\underline{Y}_C}{\underline{Y}_A} \right)} = \dot{U}_A = 120 \text{ В}.$$

КОМПЛЕКСЫ ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИЕМНИКА

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn} = 120 - 120 = 0;$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn} = (-60 - j104) - 120 = (-180 - j104) = 207,9 \cdot e^{j210^\circ} = 207,9 \cdot e^{-j150^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} = (-60 + j104) - 120 = (-180 + j104) = 207,9 \cdot e^{j150^\circ} \text{ В}.$$

Комплексы фазных токов приемника

$$\dot{I}'_B = \dot{I}_B = \dot{U}'_B \cdot \underline{Y}_B = 207,9 \cdot e^{-j150^\circ} \cdot 0,1 \cdot e^{j36^\circ 50'} = 207,9 \cdot e^{-j113^\circ 10'} = (-8,11 - j19,14) \text{ A};$$

$$\dot{I}'_C = \dot{I}_C = \dot{U}'_C \cdot \underline{Y}_C = 207,9 \cdot e^{j150^\circ} \cdot 0,04 = 8,32 \cdot e^{j150^\circ} = (-7,21 + j4,16) \text{ A};$$

$$\dot{I}'_A = -(\dot{I}'_B + \dot{I}'_C) = [(-8,11 - j19,14) + (-7,21 + j4,16)] = (-15,32 - j14,98) =$$

$$= (15,32 + j14,92) = 21,5 \cdot e^{j44^{\circ}20'} \text{ A.}$$

Строим векторную диаграмму токов и напряжений при коротком замыкании фазы A приемника (рис.3.4). Принимаем масштаб токов $m_I = 0,2 \text{ A/мм}$ и напряжения $m_U = 2 \text{ В/мм}$.

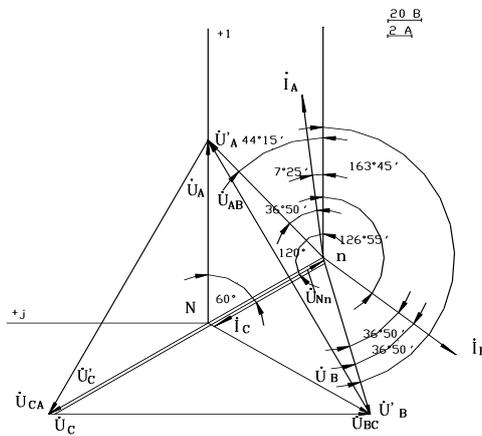


Рис. 3.2 Векторная диаграмма токов и напряжений при нормальном режиме работы

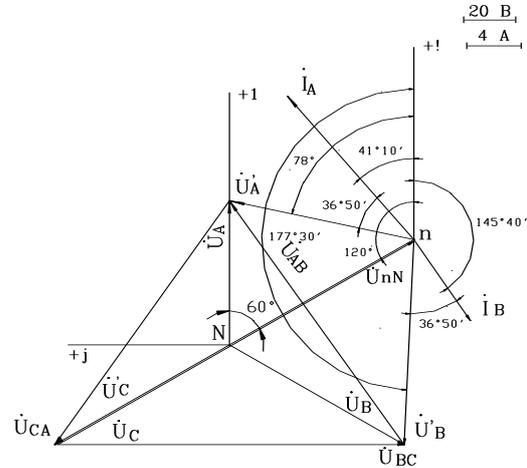


Рис. 3.3 Векторная диаграмма токов и напряжений при обрыве провода C

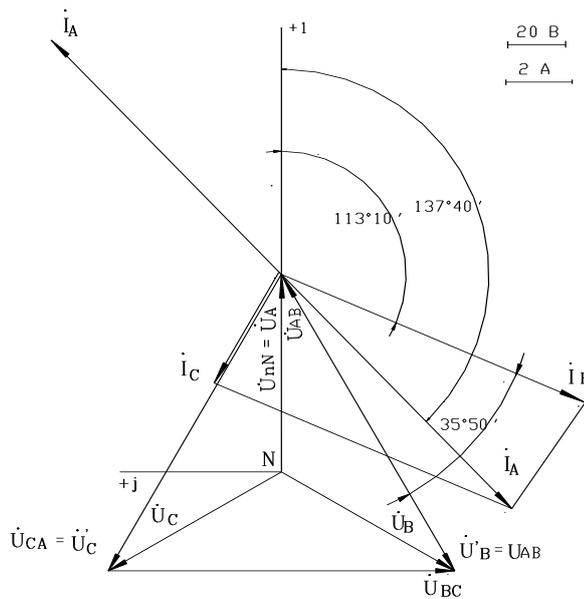


Рис. 3.4 Векторная диаграмма токов и напряжений при коротком замыкании фазы приемника

Комплексы полной мощности фаз приемника при нормальной работе

$$\dot{S}_A = \dot{U}'_A \cdot I_A^* = 107,2 \cdot e^{j44^{\circ}15'} \cdot 10,72 \cdot e^{-j7^{\circ}25'} = 1149,18 \cdot e^{j36^{\circ}50'} = (919 + j690) \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$P_A = 919 \text{ Вт}; Q_A = 690 \text{ вар.}$$

$$\dot{S}_B = \dot{U}'_B \cdot I_B^* = 107,2 \cdot e^{j196^{\circ}15'} \cdot 10,72 \cdot e^{-j233^{\circ}5'} = 1149,18 \cdot e^{-j36^{\circ}50'} = (919 - j690) \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$P_B = 919 \text{ Вт}; Q_B = -690 \text{ вар.}$$

$$\dot{S}_C = \dot{U}'_C \cdot I_C^* = 206,5 \cdot e^{j120^{\circ}} \cdot 8,26 \cdot e^{-j120^{\circ}} = 1705,7 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$P_C = 1705,7 \text{ Вт}; Q_C = 0$$

$$S = \sqrt{\sum P^2 + \sum Q^2} = \sqrt{3543,7^2 + 0} = 3543,7 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

В нашем примере реактивная мощность приемника равна 0 ($Q_{np} = 0$), а полная мощность является активной мощностью приемника, т.е. $S_{np} = P_{np}$ и $\cos \varphi_{np} = 1$

$$\cos \varphi_{np} = \frac{P_{np}}{S_{np}} = \frac{P_A + P_B + P_C}{S_{np}} = \frac{3543,7}{3543,7} = 1.$$

Пример 4

В трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В включен приемник (рис. 4.1), фазы которого имеют сопротивления:

$Z_{AB} = (4 + j3)$ Ом; $Z_{BC} = (8 + j6)$ Ом; $Z_{CA} = 10$ Ом.

Обмотки приемника соединены в “треугольник”.

Требуется определить:

- фазные и линейные токи;
- построить векторные диаграммы токов и напряжений при:

- а) нормальном режиме работы приемника;
- б) обрыве фазы CA ;
- с) обрыве провода фазы B .

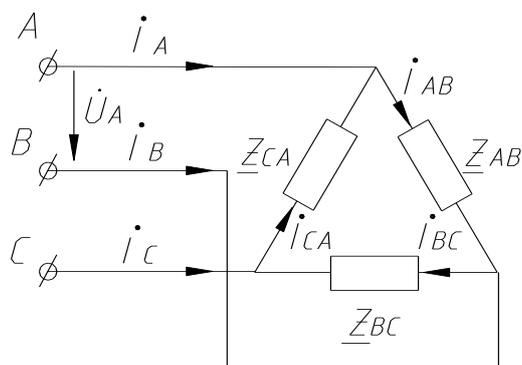


Рис. 4.1. Соединение приемника в “треугольник”

Нормальный режим работы приемника

Комплексы фазных напряжений

$$\dot{U}_{AB} = 220e^{j0^\circ} = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{BC} = 220e^{-j120^\circ} = (-110 - j190) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{CA} = 220e^{j120^\circ} = (-110 + j190) \text{ В}.$$

КОМПЛЕКСЫ ФАЗНЫХ ТОКОВ ПРИЕМНИКА

$$\dot{I}_{AB} = \dot{U}_{AB} \cdot \frac{1}{Z_{AB}} = \frac{220}{4 + j3} = \frac{220}{5e^{j36^\circ 50'}} = 44e^{-j36^\circ 50'} = (35,2 - j26,4) \text{ А};$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{10e^{j36^\circ 50'}} = 22e^{-j156^\circ 50'} = (-20,2 - j8,64) \text{ А};$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{220e^{j120^\circ}}{10} = 22e^{j120^\circ} = (-11 + j19) \text{ А};$$

Комплексы линейных токов

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = (35,2 - j26,4) - (-11 + j19) = (46,2 - j45,4) = 64,8e^{-j44^\circ 30'} \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = (-20,2 - j8,64) - (35,2 - j26,4) = (-55,4 + j17,16) = 58e^{j162^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = (-11 + j19) - (-20,2 - j8,64) = (9,2 + j27,64) = 29,2e^{j73^\circ} \text{ А};$$

Проверка: $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$;

$$(46,2 - j45,4) + (-55,4 + j17,16) + (9,2 + j27,64) = 0.$$

Строим векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 4.4). Примем масштабы напряжений $m_U = 4$ В/мм и токов $m_I = 1$ А/мм.

Обрыв фазы CA приемника

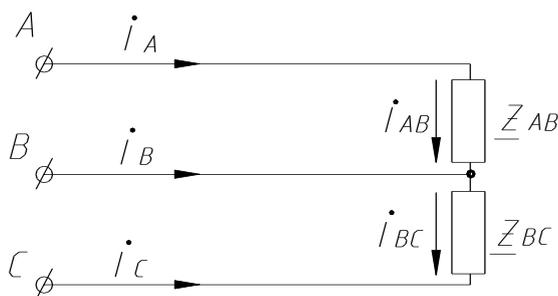


Рис. 4.2. Расчетная схема

$$\dot{I}_{BC} = -\dot{I}_C = 22e^{-j156^\circ 50'} = (-20,2 - j8,64) \text{ A};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{I}_{BC} \cdot \underline{Z}_{BC} = 22e^{-j156^\circ 50'} \cdot 10e^{j36^\circ 50'} = 220e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{AB} = \dot{I}_{AB} \cdot \underline{Z}_{AB} = 44e^{-j36^\circ 50'} \cdot 5e^{j36^\circ 50'} = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{CA} = (-\dot{U}_{BC} + \dot{U}_{AB}) = -[(-110 - j190) + 220] = (-110 + j190) = 220e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Строим векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 4.5). Примем масштабы напряжений $m_U = 4 \text{ В/мм}$ и токов $m_I = 1 \text{ А/мм}$.

Обрыв провода фазы В

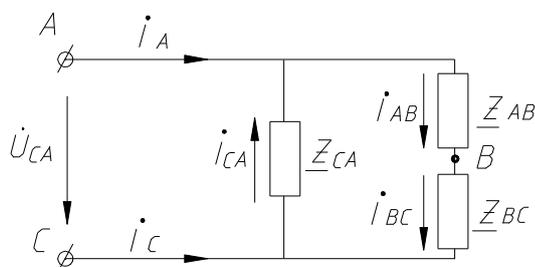


Рис. 4.3. Расчетная схема

При обрыве провода в фазе В исходная схема (рис. 4.1) преобразуется в однофазную цепь переменного тока (рис. 4.3).

Комплексы токов

$$\dot{I}_{AB} = \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC}} = \frac{220e^{j120^\circ}}{(4 + j3) + (8 + j6)} = \frac{220}{15e^{j36^\circ 50'}} = 14,67e^{j83^\circ 10'} = (1,79 + j14,52) \text{ А};$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}} = \frac{220e^{j120^\circ}}{10} = 22e^{-j120^\circ} = (-11 + j19,14) \text{ А};$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = (1,79 + j14,52) - (-11 + j19,14) = (12,79 - j4,62) = 13,3e^{-j16^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = -\dot{I}_A = -(12,79 - j4,62) = (-12,79 + j4,62) = 13,3e^{j164^\circ} \text{ А}.$$

Комплексы напряжений

$$\dot{U}_{AB} = \dot{I}_{AB} \cdot \underline{Z}_{AB} = 14,67e^{j83^\circ 10'} \cdot 5e^{j36^\circ 50'} = 73,35e^{j120^\circ} = (-36,67 + j63,52) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{I}_{BC} \cdot \underline{Z}_{BC} = 14,67e^{j83^\circ 10'} \cdot 10e^{j36^\circ 50'} = 146,7e^{j120^\circ} = (-73,35 + j127) \text{ В}.$$

Строим векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 4.6). Примем масштабы напряжений $m_U = 4 \text{ В/мм}$ и токов $m_I = 0,25 \text{ А/мм}$.

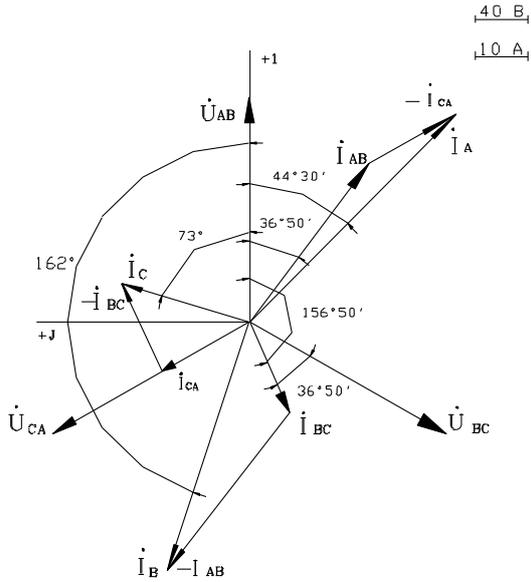


Рис. 3.8 Векторная диаграмма токов и напряжений при нормальном режиме работы

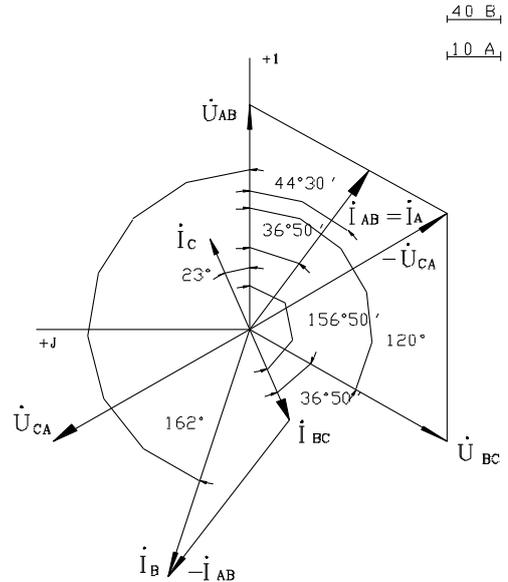


Рис. 3.9 Векторная диаграмма токов и напряжений при обрыве фазы СА

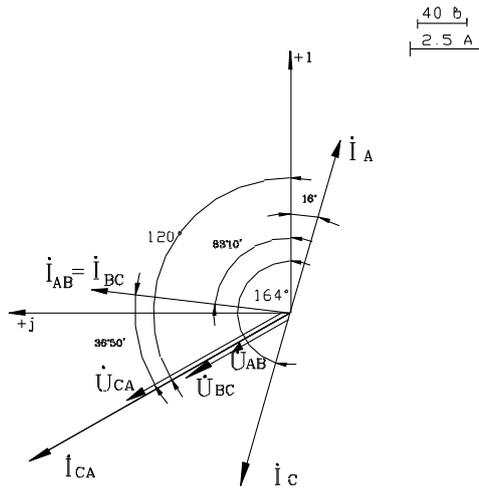


Рис. 3.10 Векторная диаграмма токов и напряжений при обрыве провода В

КОМПЛЕКСЫ МОЩНОСТЕЙ ФАЗ ПРИЕМНИКА

$$\dot{S}_{AB} = \dot{U}_{AB} \cdot I_{AB}^* = 220 \cdot 44 e^{-j36^\circ 50'} = 9680 e^{-j36^\circ 50'} = (7740,9 - j5812,1) \text{ В}\cdot\text{А.}$$

$$P_{AB} = 7740,9 \text{ Вт; } Q_{AB} = -5812,1 \text{ вар; } S_{AB} = 9680 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

$$\dot{S}_{BC} = \dot{U}_{BC} \cdot I_{BC}^* = 220 e^{-j120^\circ} \cdot 22 e^{j156^\circ 50'} = 4840 e^{j36^\circ 50'} = (3870,5 + j2906) \text{ В}\cdot\text{А.}$$

$$P_{BC} = 3870,5 \text{ Вт; } Q_{BC} = 2906 \text{ вар; } S_{BC} = 4840 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

$$\dot{S}_{CA} = \dot{U}_{CA} \cdot I_{CA}^* = 220 e^{j120^\circ} \cdot 22 e^{-j120^\circ} = 4840 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

$$P_{CA} = 4840 \text{ Вт; } Q_{CA} = 0; S_{CA} = 4840 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

$$\sum P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA} = 7740,9 + 3870,5 + 4840 = 16451,4 \text{ Вт.}$$

$$\sum Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA} = -5812,1 + 2906 + 0 = -2906,1 \text{ вар.}$$

$$S = \sqrt{\sum P^2 + \sum Q^2} = \sqrt{16451,4^2 + (-2906,1)^2} = 16701,23 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ПРИЕМНИКА

$$\cos \varphi_{np} = \frac{\sum P}{S} = \frac{16451,4}{16701,23} = 0,985.$$

Пример 5

В электрической цепи (рис. 5.1.) сопротивления $R_0 = R = 50$ Ом, индуктивностью $L=0,25$ Гн, емкостью $C = 50$ мкФ. Постоянное напряжение источника $U = 100$ В. Определить закон изменения переходного тока на неразветвленном участке цепи и построить его график. Задачу решить классическим и операторным методами.

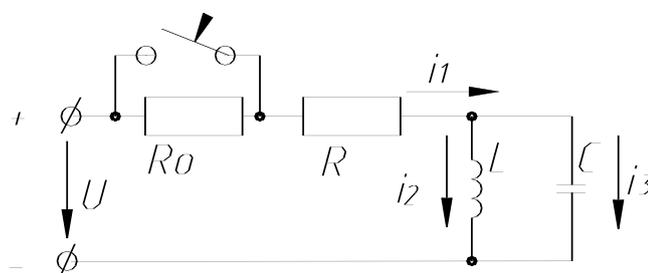


Рис. 5.1. Расчетная схема

Решение классическим методом

1. Расчет режима до коммутации (контакты разомкнуты).

- Токи в ветвях цепи:

$$i_1(0_-) = i_2(0_-) = \frac{U}{R_0 + R} = \frac{100}{50 + 50} = 1 \text{ А}; \quad i_3(0_-) = 0.$$

- Напряжение на конденсаторе

$$U_C(0_-) = 0.$$

- по первому закону коммутации

$$i_2(0) = i_2(0_-) = 1 \text{ А}.$$

- по второму закону коммутации

$$U_C(0) = U_C(0_-) = 0.$$

2. Расчет принужденного режима после коммутации (контакты замкнуты)

- токи в ветвях цепи:

$$i_{1np} = i_{2np} = \frac{U}{R} = \frac{100}{50} = 2 \text{ А}; \quad i_{3np} = 0.$$

3. Расчет искомого тока и его производной для момента коммутации ($t = 0$).

ПО ЗАКОНАМ КИРХГОФА СОСТАВЛЯЕМ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ СХЕМЫ ПОСЛЕ КОММУТАЦИИ

$$i_1 = i_2 + i_3; \quad (1)$$

$$U = R i_1 + L \frac{di_2}{dt}; \quad (2)$$

$$U = R i_1 + \frac{1}{C} \int i_3 dt. \quad (3)$$

ИСПОЛЬЗУЯ УРАВНЕНИЕ (3) ДЛЯ МОМЕНТА ВРЕМЕНИ $T = 0$ С УЧЕТОМ ЭТОГО, ЧТО $U_C(0) = 0$, НАЙДЕМ $I_1(0) = U/R = 100/50 = 2$ А.

Из уравнения (1) при $t = 0$ находим

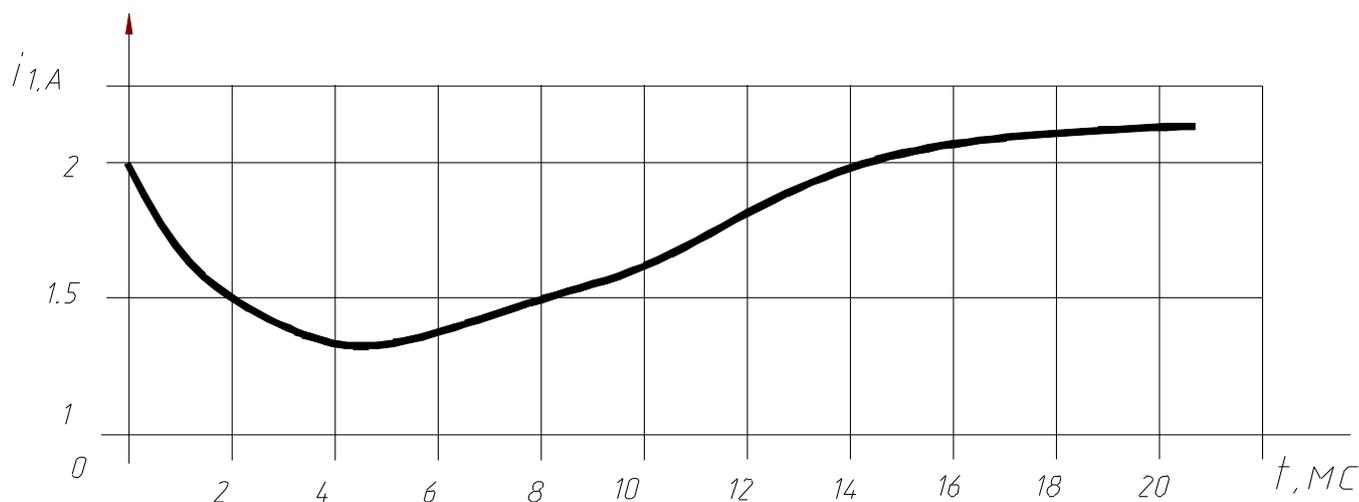
$$i_3(0) = i_1(0) - i_2(0) = 1 \text{ А}.$$

Найдем производную искомого тока i_1 . Для этого продифференцируем уравнение (3)

$$0 = R \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{i_3}{C}. \quad \text{Откуда} \quad \frac{di_1}{dt} = -\frac{i_3}{C}.$$

$$\text{СЛЕДОВАТЕЛЬНО,} \quad \frac{di_1}{dt} \Big|_{T=0} = -\frac{i_3(0)}{RC} = -\frac{1}{50 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = -400 \text{ А/с}.$$

$200t, \text{ рад}$	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0
$i_1(t), \text{ А}$	2,00	1,48	1,36	1,44	1,60	1,76	1,88	1,96	2,00	2,02	2,03

Рис. 5.2. Расчетный график переходного тока $i_1(t)$.

Решение операторным методом

Начальные условия переходного процесса в электрической цепи определены в первом пункте классического метода:

$$i_2(0) = 1 \text{ А}; U_C(0) = 0.$$

С учетом этого составим **операторную схему замещения** цепи (рис. 5.3).

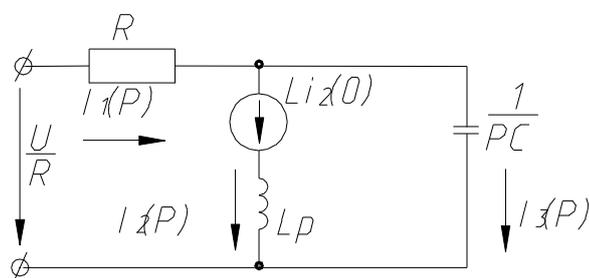


Рис. 5.3. Операторная схема замещения

Напишем для этой схемы уравнение по законам Кирхгофа

$$\begin{aligned} I_1(p) &= I_2(p) + I_3(p); \\ RI_1(p) + LpI_2(p) &= U/p + Li_2(0); \\ RI_1(p) + \frac{1}{pC} I_3(p) &= U/p. \end{aligned}$$

Решаем эту систему уравнений относительно тока $I_1(p)$

$$I_1(p) = \frac{LCUp^2 + Li_2(0)p + U}{CRp^3 + Lp^2 + Rp}. \quad (7)$$

После подстановки численных значений в уравнение (7) $L = 0,25 \text{ Гн}$; $C = 50 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$; $R = 50 \text{ Ом}$; $i_2(0) = 1 \text{ А}$; $U = 100 \text{ В}$ получим:

$$I_1(p) = \frac{2p^2 + 400p + 160000}{p^3 + 400p^2 + 80000p} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}. \quad (8)$$

Для нахождения оригинала определяем корни знаменателя уравнения (7) для чего приравняем его нулю

$$p^3 + 400p^2 + 80000p = 0.$$

Решение этого уравнения дает следующие корни $p_1 = 0$; $p_2 = -200 + j200$; $p_3 = -200 - j200$.

Так как знаменатель имеет три корня, то сумма в формуле разложения состоит из трех слагаемых.

$$i_1(t) = \frac{F_1(p_1)}{F'_2(p_1)e^{p_1 t}} + \frac{F_1(p_2)}{F'_2(p_2)e^{p_2 t}} + \frac{F_3(p_3)}{F'_3(p_3)e^{p_3 t}} \quad (9)$$

)

Находим числители слагаемых в уравнении (8)

$$F_1(p_1) = 16 \cdot 10^4; \quad F_1(p_2) = (8 - j8) \cdot 10^4; \quad F_1(p_3) = (8 + j8) \cdot 10^4$$

Производная знаменателя уравнения (8) $F'_2(p) = 3p^2 + 800p + 80000.$

Подставим вместо p соответствующие корни и получим знаменатели слагаемых:

$$F'_2(p_1) = 80000; \quad F'_2(p_2) = (-8 - j8) \cdot 10^4; \quad F'_2(p_3) = (-8 + j8) \cdot 10^4.$$

ПОЛУЧЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОДСТАВИМ В ФОРМУЛУ (9) ТЕОРЕМЫ РАЗЛОЖЕНИЯ

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \frac{16 \cdot 10^4}{8 \cdot 10^4} e^0 + \frac{(8 - j8)10^4}{(-8 - j8)10^4} e^{(-200 + j200)t} + \frac{(8 + j8)10^4}{(-8 + j8)10^4} e^{(-200 - j200)t} = \\ &= 2 + \frac{8\sqrt{2}e^{-j45^\circ}}{-8\sqrt{2}e^{j45^\circ}} e^{-200t} e^{j200t} + \frac{8\sqrt{2}e^{j45^\circ}}{8\sqrt{2}e^{j135^\circ}} e^{-200t} e^{-j200t} = \\ &= 2 - e^{-j90^\circ} e^{-200t} e^{j200t} + e^{-j90^\circ} e^{-200t} e^{-j200t} = 2 - e^{-200t} \left[e^{j(200t-90^\circ)} - e^{-j(200t+90^\circ)} \right]. \end{aligned}$$

Учитывая, что $e^{j180^\circ} = -1$, то $[-e^{j(200t+90^\circ)}] = [e^{j180^\circ} e^{-j(200t+90^\circ)}] = e^{-j(200t-90^\circ)}$.

Окончательно имеем $i_1(t) = 2 - 2e^{-200t} \cos(200t - 90^\circ) = 2 - 2e^{-200t} \sin 200t.$

Оглавление

Предисловие.....	3
1. Методические указания к изучению курса и выполнению контрольных и лабораторных работ.....	3
2. Рабочая программа курса “Теоретические основы электротехники”.....	4
3. Задания на выполнение контрольных работ.....	7
3.1. Курсовая работа № 1.....	7
Задача 1.....	8
Задача 2.....	14
3.2. Курсовая работа № 2.....	22
Задача 1.....	22
Задача 2.....	25
4. Примеры расчета электрических цепей постоянного и переменного тока.....	29
Пример 1.....	29
Пример 2.....	33
Пример 3.....	36
Пример 4.....	39
Пример 5.....	42

Учебное издание

Николай Михайлович Прыгов
Лариса Михайловна Маркарянц
Ольга Евгеньевна Широбокова
Дмитрий Владимирович Кирдищев

Теоретические основы электротехники (ТОЭ). Методические указания и задания для выполнения курсовых работ студентами-бакалаврами направления «Электроэнергетика и электротехника»

Редактор: Павлютина И.П.

Набор осуществила: Широбокова О.Е.

Подписано в печать 04.09.2014г.

Формат 60x84. 1/16 Бумага типографическая Офсетная Издательство Брянской государственной сельскохозяйственной академии

Усл. п. л. 6.10. Тираж 100 экз. Изд. № 2813.

Издательство Брянской государственной сельскохозяйственной академии

243365, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино