

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАМЧАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»)

Мореходный факультет

Кафедра «Энергетические установки и электрооборудование судов»

УТВЕРЖДАЮ
Декан мореходного факультета


/С.Ю. Труднев/
«23» октября 2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Теоретические основы электротехники»

по направлению подготовки
13.03.02 «Энергетика и электротехника»
(уровень бакалавриат)

профиль: «Электрооборудование и автоматика судов»
квалификация: бакалавр

Петропавловск-Камчатский
2024

Рабочая программа дисциплины составлена на основании ФГОС ВО по специальности 13.03.02 «Энергетика и электротехника» (уровень бакалавриат), учебного плана подготовки специалистов, принятого на заседании ученого совета ФГБОУ ВО «КамчатГТУ» 02.10.2024 г., протокол № 2

Составитель рабочей программы

Профессор, д.т.н.
(должность, ученое звание, степень)



(подпись)

Сивоконь В.П.
(Ф.И.О.)

Рабочая программа рассмотрена на заседании кафедры

«ЭУЭС»
(наименование кафедры)

Протокол № 4 от 17.10 2024 г

Заведующий кафедрой «ЭУЭС»

«23» октября 2024 г.



(подпись)

Белов О.А.
(Ф.И.О.)

1. Цели и задачи учебной дисциплины

Целью освоения дисциплины «**Теоретические основы электротехники**» является обучение студентов применять законы электромагнетизма и теории электрических цепей для корректного математического описания и теоретического исследования процессов, происходящих в различных электротехнических устройствах и сложных системах, привить студентам навыки аналитического и численного, в том числе с применением ЭВМ, расчета электрических цепей и электромагнитных устройств, научить студентов выполнять электрические и магнитные измерения, привить навыки экспериментального исследования электротехнических устройств.

Задачами изучения дисциплины «**Теоретические основы электротехники**» являются основные понятия и законы электромагнетизма и теории цепей; основные методы анализа линейных и нелинейных цепей в установившихся и переходных режимах; основные положения теории электромагнитного поля; приборы для электрических и магнитных измерений, приобретение навыков составления схем замещения электротехнических устройств в установившихся и неустойчивых режимах и расчета их параметров; применения вычислительной техники в электромагнитных расчетах; экспериментальные исследования электротехнических устройств.

2. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих *профессиональных компетенций*:

1. Способен обнаруживать неисправности в электроцепях, устанавливать места неисправностей и меры по предотвращению повреждений (**ПК-1**);
2. Способен читать электрические и простые электронные схемы (**ПК-2**).

Освоение дисциплины предполагает: изучение терминологии, понятий и законов в области электромагнитного поля, анализа электрических и магнитных цепей; освоение способов моделирования электрических и магнитных цепей схемами замещения и методов их анализа в установившихся и переходных процессах; приобретение умений и навыков практического применения теоретических основ электротехники при решении научно-исследовательских, проектно-конструкторских и эксплуатационных задач в области электроэнергетики и электротехники.

После освоения теоретического материала и выполнения практических работ студент **должен**:

Знать основные понятия и законы электромагнетизма и теории цепей; основные методы анализа линейных и нелинейных цепей в установившихся и переходных режимах; основные положения теории электромагнитного поля; приборы для электрических и магнитных измерений.

Уметь составлять схемы замещения электротехнических устройств в установившихся и неустойчивых режимах и расчет их параметров; применять вычислительную технику в электромагнитных расчетах; экспериментально исследовать электротехнические устройства.

Владеть навыками элементарных расчетов и испытаний электрических схем электрооборудования.

Планируемые результаты обучения при изучении дисциплины, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы, представлены в таблице

Код компетенции	Планируемые результаты освоения образовательной программы	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции	Планируемый результат обучения по дисциплине
ПК-1	Способен производить оценку технического состояния электрооборудования	ИД-1 _{ПК-34} . Умеет обнаруживать неисправности в электроцепях, устанавливать	Знает нормальные, аварийные, послеаварийные и ремонтные режимы работы отдельных воздушных и кабельных линий электропередачи, допустимые перегрузки по току и температурам воздушных и кабельных линий электропередачи; Марки,

		<p>места неисправностей и меры по предотвращению повреждений.</p>	<p>конструктивное исполнение кабелей; основы трудового законодательства Российской Федерации в объеме, необходимом для выполнения трудовых обязанностей; передовой производственный опыт организации эксплуатации и ремонта линий электропередачи; порядок сдачи в ремонт и приемки из ремонта кабельных линий электропередачи; правила пользования инструментом и приспособлениями, применяемыми при ремонте и монтаже энергетического оборудования; правила технической эксплуатации электроустановок потребителей; техническое обслуживание и ремонт силовых кабелей; технические характеристики, конструктивные особенности основного оборудования и 15 сооружений воздушных и кабельных линий</p> <p>Умеет вести техническую и отчетную документацию; выявлять дефекты на кабельных линиях электропередачи; применять справочные материалы, анализировать научно-техническую информацию в области эксплуатации кабельных линий электропередачи; применять автоматизированные системы мониторинга и диагностики кабельных линий; работать с текстовыми редакторами, электронными таблицами, электронной почтой и браузерами, специализированными компьютерными программами</p> <p>Владеет навыками подготовки, согласования и передачи исполнителям ремонта утвержденных дефектных ведомостей, проектов проведения работ, карт организации труда и технологической ремонтной документации, необходимой для производства работ на закрепленном оборудовании; подготовки статистической отчетности в соответствии с утвержденным перечнем; проведения тренировок, занятий по отработке действий персонала при чрезвычайных ситуациях, обучению безопасным приемам и методам труда и оказанию первой помощи пострадавшим; сбора и анализа информации об отказах новой техники и электрооборудования</p>
ПК-2	Способен обосновывать планы и программы технического обслуживания и ремонта оборудования электрических сетей	ИД-1 _{ПК-36} . Умеет читать электрические и простые электронные схемы.	<p>Знает правила технической эксплуатации электрических станций и сетей в части оборудования подстанций электрических сетей; правила эксплуатации и организации ремонта электрических сетей; Правила устройства электроустановок; порядок и методы планирования работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования подстанций электрических сетей; порядок организации обеспечения производства ремонтов оборудования подстанций электрических сетей материально-техническими ресурсами; нормы и требования, стандарты по испытаниям оборудования подстанций электрических сетей, пусконаладке; методы анализа качественных показателей работы оборудования подстанций электрических сетей; порядок вывода оборудования подстанции в ремонт и оформления нарядов-допусков для выполнения на них работ; технологию производства ремонтных работ оборудования подстанций электрических сетей; основы экономики и организации производства, труда и управления в энергетике</p> <p>Умеет анализировать и прогнозировать ситуацию по техническому состоянию и ходу ремонта оборудования подстанций электрических сетей; оценивать со-</p>

		<p>стояние техники безопасности на подстанций электрических сетей; оценивать качество произведенных работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования 16 подстанций электрических сетей; применять справочные материалы по техническому обслуживанию и ремонту оборудования подстанций электрических сетей; проводить техническое освидетельствование оборудования подстанций электрических сетей; планировать производственную деятельность, ремонты оборудования подстанций электрических сетей</p> <p>Владеет навыками подготовки проектов планов-графиков и программ технического обслуживания и ремонта оборудования подстанций электрических сетей; составления заявок на оборудование, запасные части, материалы, инструмент, защитные средства, приспособления, механизмы; составления планов мероприятий по подготовке к особым условиям работы по техническому обслуживанию и ремонту оборудования подстанций электрических сетей</p>
--	--	---

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Учебная дисциплина «**Теоретические основы электротехники**» относится к части, формируемой участниками образовательных отношений в структуре основной образовательной программы.

При изучении дисциплины используются знания и навыки по математике, физике. Результаты освоения дисциплины используются при изучении последующих дисциплин, обеспечивающих дальнейшую подготовку в области электроэнергетики и электротехники, а именно, при изучении математических задач электроэнергетики, математического моделирования, электроники, электрических машин.

Знания, умения и навыки, полученные по программе дисциплины, далее закрепляются, расширяются и углубляются при изучении студентами перечисленных выше дисциплин и при прохождении ими учебной и производственной практики, при выполнении курсовых проектов и при подготовке выпускной квалификационной работы.

4. Содержание дисциплины

Тематический план дисциплины заочной формы обучения

Наименование разделов и тем	Всего часов	Аудиторные занятия	Контактная работа по видам учебных занятий			Самостоятельная работа	Формы текущего контроля	Итоговый контроль знаний
			Лекции	Семинары (практические занятия)	Лабораторные работы			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Электрические цепи и их схемы замещения.	39	4	2	2		35	Контроль СРС, защита практических работ	
Основные понятия и законы электрических цепей. Элементарные линейные и нелинейные цепи.	40	5	2	2	1	35		
Простые линейные и нелинейные цепи постоянного тока.	41	4	2	2		37		
Сложные линейные цепи постоянного тока	40	5	2	2	1	35		
Элементарные и простые цепи переменного тока	40	5	2	2	1	35		
Электрические цепи трехфазного тока	39	4	2	2		35		

Цепи с магнитными связями	40	5	2	2	1	35		
Экзамен								
ИТОГО	288	32	14	14	4	247		9

4.2. Содержание дисциплины

Тема 1. Электрические цепи и их схемы замещения.

Лекция

Электрические цепи и их схемы соединения. Линейные и нелинейные электрические цепи. Задачи анализа и синтеза электрических цепей. Схемы замещения цепей как графическое представление задачи их анализа.

Активные и пассивные части цепей и схем замещения. Вольт-амперные характеристики и сопротивления линейных и нелинейных пассивных элементов цепей постоянного тока.

Идеальные и реальные источники электрической энергии. Идеальные источники ЭДС и тока, их внешние характеристики. Схемы замещения реальных линейных источников постоянного тока, их эквивалентные преобразования. Схемы замещения нелинейных источников электрической энергии.

Практическое занятие

Практическое занятие 1. Электрические цепи постоянного тока.

Тема 2. Основные понятия и законы электрических цепей. Элементарные линейные и нелинейные цепи.

Лекция

Законы Ома, Кирхгофа и Джоуля-Ленца. Основные понятия электрических цепей. Ток, напряжение и мощность, единицы измерений. Элементарные, простые и сложные электрические схемы, способы их анализа.

Анализ элементарных линейных и нелинейных электрических цепей (схем). Область применения закона Ома. Устойчивость решения. Критерии устойчивости.

Законы Кирхгофа и эквивалентные преобразования простых линейных и нелинейных электрических цепей (схем). Последовательность анализа простых цепей.

Мощность постоянного тока, единицы её измерения. Условие передачи максимальной мощности потребителю.

Практическое занятие

Практическое занятие 2. Аналитические методы расчета электрических цепей.

Тема 3. Простые линейные и нелинейные цепи постоянного тока.

Лекция

Эквивалентные преобразования простых линейных и нелинейных цепей постоянного тока. Устойчивость нелинейных цепей.

Метод эквивалентного генератора. Условия передачи максимальной мощности при анализе простых цепей.

Практическое занятие

Практическое занятие 3. Преобразования простых линейных и нелинейных цепей постоянного тока.

Тема 4. Сложные линейные цепи постоянного тока.

Лекция

Графические и численные методы анализа электрических цепей постоянного тока. Метод эквивалентных преобразований активных двухполюсников и метод двух узлов. Метод эквивалентного генератора. Понятие о численном анализе нелинейных цепей.

Практическое занятие

Практическое занятие 4. Неразветвленные электрические цепи переменного тока.

Практическое занятие 5. Разветвленные электрические цепи переменного тока.

Тема 5. Элементарные и простые цепи переменного тока.

Лекция

Преимущества синусоидального тока в сравнении с постоянным. Получение синусоидальной ЭДС. Способы представления синусоидальных величин - аналитический, векторный, с использованием комплексных чисел.

Элементарные цепи переменного тока. Активное, резистивное, индуктивное и емкостное сопротивление. Закон Ома для амплитудных величин в элементарных цепях, векторные диаграммы.

Действующие значения синусоидальных величин. Закон Ома для действующих значений. Мгновенная, активная, реактивная и полная мощности элементарных цепей.

Эквивалентные преобразования простых цепей в элементарные. Последовательное соединение элементов цепи, треугольники напряжений и сопротивлений. Параллельное соединение элементов цепи, треугольники токов и проводимостей. Смешанное соединение. Метод пропорциональных величин (метод построения векторных диаграмм).

Резонансы напряжений и токов. Векторные диаграммы и частотные характеристики пассивных двухполюсников переменного тока. Резонансные частоты двухполюсников.

Активная мощность в цепях переменного тока. Реактивная и полная мощности. Единицы измерения мощностей. Коэффициент мощности, способы его регулирования. Комплексная мощность цепи. Условие передачи максимальной мощности в нагрузку.

Практическое занятие

Практическое занятие 6. Элементарные и простые цепи переменного тока.

Тема 6. Трёхфазные цепи.

Лекция

Трёхфазная система. Способы соединения обмоток трехфазных генераторов. Способы соединения фаз трехфазных приемников. Расчет сложных трехфазных цепей. Мощность трехфазной цепи и способы ее измерения. Вращающееся магнитное поле. Теоретические основы метода симметричных составляющих. Расчет режима симметричной трехфазной нагрузки при несимметричном напряжении. Расчет токов коротких замыканий в энергосистеме методом симметричных составляющих. Фильтры симметричных составляющих.

Лабораторное занятие

Лабораторная работа 1. Трёхфазные электрические цепи при соединении нагрузки звездой.

Тема 7. Цепи с магнитными связями.

Лекция

Катушки с магнитными связями. Согласное и встречное соединение катушек. Взаимная индуктивность. Коэффициент связи.

Анализ простых цепей с магнитными связями. Векторные диаграммы при последовательном и параллельном соединении катушек с магнитной связью. Способы экспериментального определения величины взаимной индуктивности.

Анализ сложных цепей с магнитными связями, ограничения на методы его проведения. Развязывание магнитных связей.

Лабораторное занятие

Лабораторная работа 4. Трёхфазные электрические цепи при соединении нагрузки звездой.

Тема 8. Четырехполюсники и фильтры.

Пассивные четырехполюсники и их уравнения. Способы соединения четырехполюсников. Определение результирующих параметров при различных соединениях. Регулярность соединений.

Экспериментальное определение А-параметров четырехполюсников и расчет других групп параметров. Схемы замещения четырехполюсников и их параметры. Характеристические (вторичные) параметры четырехполюсников. Согласования четырехполюсника с генератором и нагрузкой, уравнения четырехполюсников с использованием гиперболических функций. Понятие о передаточной функции.

Фильтры, их виды и назначения. Основы теории К-фильтров. Понятия о других видах фильтров - m-фильтры и RC-фильтры.

Практическое занятие

Практическое занятие 7. Четырехполюсники и фильтры.

Тема 9. Длинные линии при синусоидальных воздействиях.

Определение цепей с распределенными параметрами (длинных линий). Схема замещения уединенных линий, её телеграфные уравнения.

Решение телеграфных уравнений при синусоидальных воздействиях. Характеристические параметры линий. Падающая и отраженная волны. Начальные и конечные условия. Коэффициент отражения. Уравнения линии через характеристические параметры и гиперболические функции.

Фазовая скорость. Линия без искажений. Линия без потерь.

Практическое занятие

Практическое занятие 8. Длинные линии при синусоидальных воздействиях.

Тема 10. Анализ цепей при периодических процессах.

Разложение периодического процесса в ряд Фурье. Определение коэффициентов ряда. Расчет периодических токов методом наложения. Резонансные явления на отдельных гармониках, условия резонансов. Коэффициенты, характеризующие форму процесса.

Действующее значение периодического процесса. Мощность в периодическом процессе. Коэффициент мощности. Метод эквивалентных синусоид и векторные диаграммы. Метод симметричных составляющих при анализе периодических процессов в трёхфазных цепях.

Практическое занятие

Практическое занятие 9. Анализ цепей при периодических процессах.

Тема 11. Методы анализа переходных процессов в нелинейных цепях.

Общая характеристика методов анализа переходных процессов в нелинейных цепях.

Метод графического расчета определенного интеграла в цепях первого порядка. Метод интегрируемой нелинейной аппроксимации характеристики нелинейного элемента в цепях первого порядка.

Метод кусочно-линейной аппроксимации.

Практическое занятие

Практическое занятие 10. Анализ переходных процессов в нелинейных цепях.

Тема 12. Электростатическое поле.

Элементы векторного анализа. Сложение векторов, скалярное и векторное произведение векторов, градиент скалярного потенциала, дифференциальный оператор, поток вектора, дивергенция вектора, ротор вектора.

Теоремы Остроградского-Гаусса и Остроградского-Стокса.

Свободные и связанные заряды. Основные величины электростатического поля. Поляризация диэлектриков. Теорема Гаусса. Конденсаторы. Емкость. Энергия электростатического поля. Силы в электростатическом поле.

Проводники в электростатическом поле. Граничные условия. Электростатическое экранирование.

Практическое занятие

Практическое занятие 11. Электростатическое поле.

Тема 13. Поле электрического тока.

Ток проводимости. Закон Ома и первый закон Кирхгофа в дифференциальной форме. Ток смещения. Закон Джоуля - Ленца в дифференциальной форме. Ток переноса. Интегральные формы основных законов электротехники.

Практическое занятие

Практическое занятие 12. Электростатическое поле.

Тема 14. Электромагнитное поле.

Основные величины магнитного поля. Непрерывность линий магнитной индукции. Понятие о магнитной цепи. Закон полного тока. Прямая и обратная задачи анализа магнитных цепей. Аналогия между магнитными и электрическими цепями. Законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей.

Взаимодействие тока с посторонним однородным магнитным полем, их взаимная энергия. Взаимная индуктивность. Собственная магнитная энергия тока. Индуктивность. Магнитная проницаемость. Намагничивание материалов. Магнитное экранирование.

Электромагнитная индукция. Первое и второе уравнения Максвелла. Закон электромагнитной индукции.

Практическое занятие

Практическое занятие 13. Электростатическое поле.

5. Учебно-методическое обеспечение для самостоятельной работы обучающихся

5.1. Внеаудиторная самостоятельная работа курсантов / студентов

Самостоятельная работа студентов по дисциплине «Теоретические основы электротехники» является важной составляющей частью подготовки студентов выполняется в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования (ФГОС ВО) и учебным планом КамчатГТУ.

Самостоятельная работа студентов ставит своей целью:

1. развитие навыков ведения самостоятельной работы;
2. приобретение опыта систематизации полученных результатов исследований, формулировку новых выводов и предложений как результатов выполнения работы;
3. развитие умения использовать научно-техническую литературу и нормативно-методические материалы в практической деятельности;
4. приобретение опыта публичной защиты результатов самостоятельной работы.

5.2 Контрольные вопросы по дисциплине

1. Определение электрической цепи, ее основные характеристики: напряжение, ток, энергия, мощность.
2. Режимы электрических цепей. Основные структурные понятия электрической цепи: ветвь, узел, контур. Последовательное и параллельное соединение цепей.
3. Энергетический баланс в электрической цепи. Физические процессы в электрической цепи
4. Теорема о компенсации. Теорема о линейных отношениях. Теорема об эквивалентном генераторе.
5. Первый и второй закон Кирхгофа.
6. Получение синусоидального тока.
7. Векторные диаграммы переменных токов и напряжений
8. Активный, индуктивный, емкостной элементы электрической цепи.
9. Электрическая цепь с последовательным соединением элементов R, L и C
10. Электрическая цепь с параллельным соединением элементов R, L и C.
11. Активные и реактивные составляющие токов и напряжений
12. Среднее, максимальное и действующее значение синусоидальной величины.

13. Представление синусоидальных величин в виде тригонометрических функций, графиков изменений функций во времени, вращающихся векторов, комплексных чисел.
14. Активное, индуктивное и емкостное сопротивление.
15. Неразветвленная цепь переменного тока. Резонанс напряжений.
16. Электрическая цепь с параллельным соединением ветвей. Резонанс токов.
17. Активные и реактивные составляющие токов и напряжений
18. Передача энергии от активного двухполюсника
19. Последовательное соединение магнитносвязанных катушек
20. Сложная цепь с магнитносвязанными катушками.
21. Линейный (без сердечника) трансформатор
22. Круговая диаграмма тока и напряжений для элементов последовательной цепи.
23. Трехфазная цепь переменного тока. Соединение фаз "звездой".
24. Трехфазная цепь переменного тока. Соединение фаз "треугольником".
25. Мощность в трехфазных цепях.
26. Различные режимы работы трехфазной цепи.
27. Принцип действия однофазного трансформатора.
28. Режимы работы трансформатора.
29. Трехфазные трансформаторы, измерительные трансформаторы, автотрансформаторы.
30. Системы электроизмерительных приборов.
31. Измерение тока, напряжения и сопротивления.
32. Электрические методы измерения неэлектрических величин.
33. Мощность трехфазной цепи и способы ее измерения.
34. Вращающееся магнитное поле.
35. Сущность переходных процессов в электрических цепях
36. Законы коммутации.
37. Переходной процесс в цепи, содержащей R и L элементы.
38. Переходной процесс в цепи, содержащей R и C элементы.
39. Классический метод расчета переходного процесса
40. Операторный метод расчета переходного процесса

6. Рекомендуемая литература

6.1. Основная литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник 10-е изд. – М.:Юрайт, 2013. – 701с.
2. Бакеев Д.А..Теоретические основы электротехники: Учебное пособие. П-Камчатский.: КамчатГТУ , 2007. – 87 с.

6.2. Дополнительная литература

3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Учебник -10-е изд. М.: Юрайт, 2013. – 317с.
4. Лоторейчук Е.А. Теоретические основы электротехники. Метод.указан.2-е изд.перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2000. – 224 с.
5. Иванов И.И. Электротехника.Основные положения, примеры и задачи – 2-е изд.испр.-СПб.: Лань, 2003. –496 с.

5.3.Методическое обеспечение:

6. Марченко А.А.Теоретические основы электротехники.: Лабораторный практикум для студентов заочной форм обучения / А.А. Марченко. – Петропавловск-Камчатский :КамчатГТУ,

2018. – 60 с.

7. Исакова В.В. Теоретические основы электротехники : методические указания к расчетно-графическим работам для студентов очной и заочной форм обучения / В.В. Исакова. – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2013. – 24 с.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

1. Электронно-библиотечная система «eLibrary»: [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.elibrary.ru>

8. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Методика преподавания данной дисциплины предполагает чтение лекций, проведение практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций по отдельным (наиболее сложным) специфическим проблемам дисциплины. Предусмотрена самостоятельная работа студентов, прохождение аттестационных испытаний промежуточной аттестации, а также написание курсовой работы (для очной и заочной форм обучения) и контрольной работы (для студентов заочной формы обучения).

Лекции проводятся, как правило, в интерактивной форме с элементами дискуссий, и спорных посылов и утверждений. На лекциях рассматриваются основные понятия предметной области, методы, приемы и средства функционирования электроэнергетических систем и сетей. При проведении лекций используются современные информационные технологии, демонстрационные материалы. Текущий контроль учебы курсантов и студентов проводится на лабораторных и практических занятиях.

Практические занятия проводятся в виде детального практического разбора конкретных ситуаций в реальных электрических цепях и устройствах, обсуждения логики поиска решений задач (проблем), разбора заданий для самостоятельной работы

Лабораторные работы с письменным и устным отчетом о разработанном плане проведения работы, методах контроля основных электротехнических процессов и параметров, полученных результатах и их осмыслении, с демонстрацией использованных при этом информационных технологий. По каждой практической и лабораторной работе оформляется отчет, на основании которого проводится защита работы (цель – оценка уровня освоения учебного материала). По результатам лабораторных и практических работ в каждом семестре выставляется оценка, которая учитывается при промежуточной и итоговой аттестации по дисциплине. Студенты заочной формы обучения выполняют задания по практическим работам в период самостоятельного освоения дисциплины (после установочных сессий) и представляют отчеты по лабораторным занятиям во время лабораторно-экзаменационных сессий.

Целевое назначение практических занятий состоит в развитии самостоятельности мышления студентов; углублении, расширении, детализировании знаний, полученных на лекции в обобщенной форме, и содействии выработке навыков профессиональной деятельности, рассматриваются примеры решения профессиональных задач, осуществляется контроль результатов освоения учебного материала. При этом формируются практические навыки, необходимые в дальнейшем при выполнении курсового проекта. Студенты заочной формы обучения индивидуально выполняют контрольную работу, результаты которой используются для промежуточной и итоговой аттестации.

Важным этапом курса является выполнение курсовой работы, который представляет собой решение научно-практической задачи. При выполнении КР следует руководствоваться методическими указаниями по выполнению КР данной программы. Защита КР проводится в сроки, предусмотренные графиком учебного процесса, публично.

9. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационно-справочных систем

9.1 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса

1. электронные образовательные ресурсы, представленные в п. 6 и 7 данной рабочей программы;
2. использование слайд-презентаций;

9.2. Перечень программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса

При освоении дисциплины используется лицензионное программное обеспечение:

1. текстовый редактор Microsoft Word;
2. электронные таблицы Microsoft Excel;
3. презентационный редактор Microsoft Power Point;

10 Материально-техническое обеспечение дисциплины

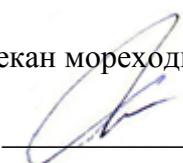
1. для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, самостоятельной работы учебная аудитория № 3-411 с комплектом учебной мебели на 32 посадочных места;
2. доска аудиторная;
3. презентации в PowerPoint по темам курса «ТОЭ»;
4. мультимедийное оборудование (ноутбук, проектор);
5. лабораторные стенды.
6. кодоскоп;
7. комплект слайдов для кодоскопа

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАМЧАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»)

Факультет МОРЕХОДНЫЙ

Кафедра «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СУДОВ»

УТВЕРЖДАЮ
Декан мореходного факультета



С.Ю. Труднев

«23» октября 2024 г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДИСЦИПЛИНЫ

«Теоретические основы электротехники»

по направлению подготовки
13.03.02 «Энергетика и электротехника»
(уровень бакалавриат)

профиль: «Электрооборудование и автоматика судов»
квалификация: бакалавр

Петропавловск-Камчатский
2024

Фонд оценочных средств дисциплины составлен на основании ФГОС ВО по специальности 13.03.02 «Энергетика и электротехника» (уровень бакалавриат), учебного плана подготовки специалистов, принятого на заседании ученого совета ФГБОУ ВО «КамчатГТУ» 02.10.2024 г., протокол № 2.

Составитель фонда оценочных средств

Профессор кафедры «РЭС»

(должность, уч. звание, степень)

(подпись)

Сивоконь В.П.

(ФИО)

Фонд оценочных средств рассмотрен на заседании кафедры «Энергетические установки и электрооборудование судов»

«17» октября 2024 г, протокол № 4

Заведующий кафедрой «Энергетические установки и электрооборудование судов»

«23» октября 2024 г.

Белов О.А.

АКТУАЛЬНО НА

2025 / 2026 учебный год

(подпись)

Белов О.А.

(ФИО. зав.кафедрой)

2026 / 2027 учебный год

(подпись)

(ФИО. зав.кафедрой)

2027 / 2028 учебный год

(подпись)

(ФИО. зав.кафедрой)

2028 / 2029 учебный год

(подпись)

(ФИО. зав.кафедрой)

2029 / 2030 учебный год

(подпись)

(ФИО. зав.кафедрой)

Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации студентов по дисциплине «**Теоретические основы электротехники**» представлен в приложении к рабочей программе дисциплины и включает в себя:

1. паспорт фонда оценочных средств по дисциплине;
2. перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы;
3. описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание их шкал оценивания;
4. методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков, характеризующих этапы формирования компетенций.

В ходе изучения этой учебной дисциплины обучаемые **должны**:

Знать: основные понятия и законы электромагнитного поля и теории электрических и магнитных цепей; методы анализа цепей постоянного и переменного токов.

Уметь: читать электротехническую литературу со знанием символики, пониманием терминологии и т. п.; пользоваться современными методами расчета переходных и установившихся процессов в линейных и нелинейных электрических цепях; понимать сущность физических процессов в простейших электрических, электронных и магнитных цепях и электромагнитных полях; ориентироваться в основных свойствах, схемах функционирования, возможностях и назначении рассматриваемых простейших устройств; приводить в действие простейшие устройства, руководствуясь инструкциями и правилами (включать, отключать, регулировать, констатировать отклонения от норм, оценивать результаты и прочее); оценивать роль электрической энергии в жизни современного общества; оценивать успехи развития отечественной электроэнергетики; пользоваться общими и фундаментальными сведениями, без которых нельзя эффективно использовать электротехнические и электронные приборы и устройства, а тем более их проектировать по заданным требованиям; электротехнического оборудования; выбирать электротехнические устройства для решения конкретных технических задач при исследовании, проектировании и эксплуатации соответствующего оборудования; использовать паспортные данные для определения номинальных режимов работы оборудования; контролировать целостность цепей электротехнических устройств, правильность их настройки; опытным путем определять параметры схем замещения; обеспечить безопасную работу персонала с электроустановками; проводить исследовательскую работу.

1. Паспорт фонда оценочных средств по дисциплине «Теоретические основы электротехники»

№	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции (или ее части)	Наименование оценочного средства
1	1. Цепи постоянного тока	ПК-1, ПК-2	Конспект лекций по темам СРС, защита отчета по практической и курсовой работам
2	2. Однофазные электрические цепи переменного тока		
3	3. Трехфазные цепи		
4	4. Переходные процессы в линейных цепях		
5	5. Нелинейные цепи постоянного тока		
8	6. Нелинейные цепи переменного тока		
9	7. Линии с распределенными параметрами		
10	8. Теория электромагнитного поля		

Контроль поэтапного формирования результатов освоения дисциплины *для студентов и студентов очной формы обучения* осуществляется в рамках текущего контроля и промежуточной аттестации в ходе выполнения заданий на практических занятиях, выполнении заданий, вынесенных на самостоятельную работу (СР), а также при сдаче зачета в 4 семестре.

Контроль поэтапного формирования результатов освоения дисциплины *для студентов заочной формы обучения* осуществляется в рамках текущего контроля и промежуточной атте-

станции в ходе выполнения заданий на практических занятиях, выполнении заданий, вынесенных на самостоятельную работу (СР), выполнении расчетно-графической работы (контрольной работы) (РГР (Кр)), а также при сдаче зачета на 3 курсе.

2. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы

№ п/п	Код контролируемой компетенции	Наименование контролируемой компетенции	Знать	Уметь	Владеть
1	ПК-1	Способен производить оценку технического состояния электрооборудования	-правила безопасного технического использования, технического обслуживания, диагностирования и ремонта судового электрооборудования и средств автоматики	Пользоваться справочными материалами, по изоляционным конструкциям и отдельным диэлектрикам; производить выбор изоляции линий электропередачи и распределительных устройств высокого напряжения; проводить расчет максимальных значений перенапряжений в электрических сетях; выбирать способы защиты электрооборудования от перенапряжений и защитные аппараты.	навыками безопасного технического использования, технического обслуживания, диагностирования и ремонта судового электрооборудования и средств автоматики.
2	ПК-2	Способен обосновывать планы и программы технического обслуживания и ремонта оборудования электрических сетей	Знает правила технической эксплуатации электрических станций и сетей в части оборудования подстанций электрических сетей. Правила устройства электроустановок, порядок и методы планирования работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования подстанций электрических сетей материально-техническими ресурсами.	Умеет анализировать прогнозировать ситуацию по техническому состоянию и ходе ремонта оборудования подстанций электрических сетей, оценивать состояние техники безопасности на подстанциях электрических сетей, оценивать качество произведенных работ	Владеет навыками подготовки проектов планов-графиков и программ технического обслуживания и ремонта оборудования подстанций электрических сетей, составления заявок на оборудование, запасные части, материалы, инструмент, защитные

				по техническому обслуживанию и ремонту оборудования подстанций электрических сетей.	средства, приспособления, механизмы.
--	--	--	--	---	--------------------------------------

3 Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание их шкал оценивания

Критерии выставления оценок за практическую работы

Оценка «**отлично**» выставляется, если студент показал глубокие знания и понимание программного материала по теме практической работы, умело увязывает лекционный материал с практикой, грамотно и логично строит ответ на контрольные вопросы.

Оценка «**хорошо**» выставляется, если студент твердо знает программный материал по теме практической работы, грамотно его излагает, не допускает существенных неточностей в ответе на контрольные вопросы. Правильно применяет полученные знания при решении практических вопросов.

Оценка «**удовлетворительно**» выставляется, если студент имеет знания только основного материала по поставленным контрольным вопросам, но не усвоил его деталей, для принятия правильного решения требует наводящих вопросов, допускает отдельные неточности или недостаточно четко излагает учебный материал по теме практической работы.

Оценка «**неудовлетворительно**» выставляется, если студент допускает грубые ошибки в ответе на контрольные вопросы, не может применять полученные знания на практике.

Критерии выставления оценок за самостоятельную работу

Оценка «**отлично**» выставляется, если студент показал глубину проработки темы самостоятельной работы, умело привязывает материал к области практического применения и показал высокий уровень освоения изложенного материала.

Оценка «**хорошо**» выставляется, если студент показал глубину проработки темы самостоятельной работы, умело привязывает материал к области практического применения, показал достаточно высокий уровень освоения изложенного материала, однако при оформлении конспекта допускает немногочисленные ошибки в схемах радиотехнических цепей и при выводах основных выражений.

Оценка «**удовлетворительно**» выставляется, если студент показал глубину проработки темы самостоятельной работы, показал удовлетворительный уровень освоения изложенного материала, однако не увязывает изложенный материал с областью практического применения, при оформлении конспекта допускает грубые ошибки в схемах радиотехнических цепей и при выводах основных выражений.

Оценка «**неудовлетворительно**» выставляется, если студент провел поверхностное изучение темы самостоятельной работы, показал неудовлетворительный уровень освоения изложенного материала, не увязывает изложенный материал с областью практического применения, при оформлении конспекта допускает грубые ошибки в схемах радиотехнических цепей и при выводах основных выражений.

Критерии выставления оценок за РГР, контрольную работу

Оценка **«отлично»** выставляется, если студент свободно увязывает принятые им способы решения поставленных задач с теоретическими положениями, легко ориентируется в написанном им тексте, работа оформлена технически грамотно.

Оценка **«хорошо»** выставляется, если студент может обосновать применённые способы решения задач, но может допускать мелкие ошибки, свободно понимает, как их можно исправить, работа оформлена в основном технически грамотно.

Оценка **«удовлетворительно»** выставляется, если студент/студент увязывает принятые им способы решения поставленных задач с теоретическими положениями посредством наводящих вопросов, иногда с затруднениями понимает, как можно исправить мелкие ошибки, имеются погрешности в оформлении работы.

Оценка **«неудовлетворительно»** выставляется, если выясняется, что студент выполнил курсовую работу (контрольную работу или РГР) формально, без понимания принципов решения поставленных задач, не ориентируется в написанном им тексте, при защите не понимает, как исправить допущенные ошибки.

Студент не сдавший РГР, контрольные, а также не выполнивший практические работы до зачета не допускается.

Критерии оценки знаний, умений и навыков на экзамене

Оценка студенту на экзамене может быть выставлена по текущим оценкам приобретенных практических навыков в ходе прохождения практики и при наличии конспекта вопросов, отданных на самостоятельное изучение **при условии отсутствия пропусков занятий без уважительной причины.**

При несоблюдении данных условий студент дополнительно проходит собеседование по теоретическим вопросам. В случае несогласия студента с выставляемой оценкой по результатам выполнения практических заданий в семестре ему предоставляется шанс повысить данную оценку посредством теоретических вопросов.

По результатам собеседования студенту выставляется оценка:

«отлично», если студент показал глубокие знания и понимание программного материала по поставленному вопросу, умело увязывает его с практикой, грамотно и отлично строит ответ, быстро принимает оптимальные решения при решении практических вопросов и задач, безусловно владеет правилами работы с контрольно-измерительной аппаратурой;

«хорошо», если студент твердо знает программный материал, грамотно его излагает, не допускает существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет полученные знания при решении практических вопросов и задач, владеет приемами работы с контрольно-измерительной аппаратурой;

«удовлетворительно», если студент имеет знания только основного материала по поставленному вопросу, но не усвоил деталей, требует в отдельных случаях наводящего вопроса для принятия правильного решения, допускает отдельные неточности и недостаточно четко выполняет правила работы с контрольно-измерительной аппаратурой;

«неудовлетворительно», если студент допускает грубые ошибки в ответе на поставленный вопрос, не может применить полученные знания на практике, неуверенно работает с контрольно-измерительной аппаратурой.

Вопросы для подготовки к экзамену

1. Определите понятия «электрическая цепь», «электрическая схема», «узел», «устранимый узел», «ветвь», «источник ЭДС» и «источник тока».
2. Как выбирают положительные направления для токов ветвей и как связаны с ними положительные направления напряжений на сопротивлениях?
3. Что понимают под ВАХ?
4. Нарисуйте ВЛХ реального источника, источника ЭДС, источника тока, линейного резистора.

5. Сформулируйте закон Ома для участка цепи с ЭДС, первый и второй законы Кирхгофа. Запишите в буквенном виде, сколько уравнений следует составлять по первому и сколько по второму закону Кирхгофа. Для двух законов Кирхгофа дайте по две формулировки.
6. Чем следует руководствоваться при выборе контуров, для которых следует составлять уравнения по второму закону Кирхгофа. Почему ни в один из этих контуров не должен входить источник тока?
7. Поясните этапы построения потенциальной диаграммы.
8. В чем отличие напряжения от падения напряжения?
9. Охарактеризуйте основные этапы метода контурных токов (МКТ) и метода узловых потенциалов (МУП). При каком условии число уравнений по МУП меньше числа уравнений по МКТ?
10. Сформулируйте принцип и метод наложения.
11. Сформулируйте и докажите теорему компенсации.
12. Запишите и поясните линейные соотношения в электрических цепях.
13. Что понимают под входными и взаимными проводимостями? Как их определяют аналитически и как опытным путем?
14. Покажите, что метод двух узлов есть частный случай МУП.
15. Приведите примеры, показывающие полезность преобразования звезды в треугольник и треугольника в звезду.
16. Сформулируйте теорему компенсации и теорему вариаций.
17. Дайте определение активного двухполюсника, начертите две его схемы замещения, найдите их параметры, перечислите этапы расчета методом эквивалентного генератора.
18. Запишите условие передачи максимальной мощности нагрузке. Каков при этом КПД?
19. Какими тремя величинами характеризуют синусоидально изменяющуюся величину
20. Каков смысл стрелки, указывающей положительное направление для ка ветви и напряжения на элементе цепи? Что понимают под затухающим значением тока (напряжения)?
21. Поясните процесс прохождения синусоидального тока через индуктивную катушку.
22. Поясните процесс прохождения синусоидального тока через конденсатор.
23. Изложите основы символически и метода расчета. На каком основании все методы расчета цепей постоянного тока применимы к цепям синусоидального тока?
24. Дайте определение векторной и топографической диаграммам.
24. Какому моменту времени соответствует положение векторов токов и напряжений на векторной диаграмме?
26. Как определить напряжение между двумя точками схемы по топографической диаграмме?
27. Физически интерпретируйте P , Q , S .
28. Выразите комплексную мощность S через комплексы напряжения и тока.
29. Запишите условие резонансного режима двухполюсника.
30. Что понимают под добротностью индуктивной катушки, конденсатора и резонансного контура? Что физически характеризует каждая из них?
31. Дайте определение режиму резонанса токов и режиму резонанса напряжений.
32. Какие двухполюсники называют реактивными?
33. Как по виду частотной характеристики реактивного двухполюсника можно определить, какие и в каком количестве будут возникать в нем резонансные режимы при изменении?
34. Какой должна быть взята нагрузка, присоединяемая к активному двухполюснику, чтобы в ней выделялась максимальная мощность?
35. Дайте определение согласующего и идеального трансформаторов.
36. Как в расчете учитывают наличие магнитной связи между индуктивными катушками?
37. Какой смысл имеют вносимые сопротивления B трансформаторе?
38. Что понимают под развязыванием магнитно-связанных цепей? С какой целью его осуществляют?
39. Покажите на примере, как практически осуществить развязывание цепей, положив в основу принцип неизменности потокосцепления каждого контура до и после развязывания.
40. Сформулируйте теорему о балансе активных и реактивных мощностей.

41. Дайте определение трехфазной симметричной системы ЭДС. Какими достоинствами объясняется широкое распространение систем в энергетике?
42. Что понимают под линейными и нулевыми проводами, линейными и фазовыми напряжениями и токами? Как вы объясните, что напряжения, которые получают от трехфазных цепей, могут быть представлены следующим рядом: 127, 220, «380, 660 В»?
43. Каковы функции нулевого провода в системе звезда — звезда при несимметричной нагрузке? При каких способах соединения генератора с нагрузкой линейный ток равняется фазовому?
44. При каких способах соединения генератора с нагрузкой линейное напряжение равняется фазовому?
45. На распределительном щитке выведены три конца симметричной трехфазной системы ЭДС. Как определить зажимы фаз А, В, С?
46. Что понимают под активной и полной мощностями трехфазной системы?
47. Почему при симметричной нагрузке расчет можно вести на одну фазу?
48. Охарактеризуйте условия получения трехфазного кругового вращающегося магнитного поля.
49. Начертите кривую, по которой будет перемещаться конец вектора результирующей магнитной индукции вращающегося магнитного поля, которое образуется при обрыве фазы А трехфазной симметричной системы.
50. Что свойственно прямой, нулевой и обратной последовательностям фаз?
51. Как разложить несимметричную трехфазную систему на три симметричных?
52. Объясните, почему сопротивление на фазу элементов трехфазных систем (линии передачи, трехстержневого трансформатора, асинхронного двигателя) неодинаково для различных последовательностей.
53. Дайте определение переходному процессу.
54. Что понимают под принужденными и свободными токами и напряжениями?
55. Сформулируйте законы (правила) коммутации.
56. Дайте определение зависимым и независимым начальным условиям.
57. Какие вы знаете способы составления характеристического уравнения.
58. Объясните, почему при составлении характеристического уравнения путем приравнивания нулю входного сопротивления $Z(p) = N(p)/M(p)$ в общем случае нельзя сокращать числитель и знаменатель дроби на общий множитель.
59. Чем определяется число корней характеристического уравнения?
60. Изложите сущность классического метода расчета и принцип составления уравнений для определения постоянных интегрирования.
61. Переходный процесс в некоторой цепи сопровождается биениями. О чем это может свидетельствовать?
62. Дайте обоснование обобщенным законам коммутации.
63. Запишите известные вам соотношения между $f(p)$ и $F(p)$, а также теоремы операторного метода и предельные соотношения.
64. Почему p называют комплексной частотой?
65. Охарактеризуйте этапы расчета операторным методом.
66. В чем особенности расчета переходных процессов операторным методом при синусоидальном источнике и ненулевых начальных условиях?
67. Охарактеризуйте свойства единичной функции и свойства дельта-функции.
68. Определите переходную и импульсную переходную проводимости (сопротивления) и функции. Укажите, с какой целью они используются.
69. Охарактеризуйте идею расчета с помощью интеграла Дюамеля.
70. Прокомментируйте известные вам формы записи интеграла Дюамеля.

Опрос

Опрос, коллоквиум проводит преподаватель по всем темам дисциплины. Знания, умения, навыки студента при проведении опроса оцениваются «зачтено», «не зачтено». Основой для определения оценки служит уровень освоения студентами и студентками материала, предусмотренного данной рабочей программой.

Оценивание студента во время опроса по дисциплине «**Теоретические основы электротехники**» :

Оценка	Требования к знаниям
«Зачтено»	Оценка «зачтено» выставляется обучающемуся, который усвоил предусмотренный программный материал; правильно, с применением примеров, показал систематизированные знания по темам дисциплины, способен связать теорию с практикой, тему вопроса с другими темами данного курса, других изучаемых дисциплин.
«Не зачтено»	Оценка «не зачтено» выставляется в следующих случаях: 1. Обучающийся не справился с заданием, не может ответить на вопросы предложенные преподавателем, не обладает целостным представлением об изучаемой теме и ее взаимосвязях. 2. Ответ на вопрос полностью отсутствует. 3. Отказ от ответа.

4 Методические материалы определяющие, процедуры оценивания знаний, умений, навыков и или опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Оценка знаний, умений и навыков или опыта деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций по дисциплине проводятся в форме текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

Текущий контроль проводится в течение сессии с целью определения уровня усвоения обучающимися знаний, формирования умений и навыков, своевременного выявления преподавателем недостатков в подготовке обучающихся и принятия необходимых мер по её коррективке, а так же для совершенствования методики обучения, организации учебной работы и оказания индивидуальной помощи обучающемуся.

Промежуточная аттестации по дисциплине проводится в виде опроса, тестирования на дифференцированном зачете (зачете, экзамене).

За знания, умения и навыки, приобретенные обучающимися в период их обучения, выставляются оценки: «ОТЛИЧНО», «ХОРОШО», «УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО», «НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО».

Для оценивания знаний, умений, навыков или опыта деятельности в университете применяется система оценки качества освоения образовательной программы.

Оценка проводится при проведении текущего контроля успеваемости и промежуточных аттестаций обучающихся.

Процедура оценивания – порядок действий при подготовке и проведении аттестационных испытаний и формировании оценки.

Аттестационные испытания проводятся ведущим преподавателем по данной дисциплине. Присутствие посторонних лиц в ходе проведения аттестационных испытаний без разрешения ректора или проректора не допускается (за исключением работников университета,

выполняющих контролирующие функции в соответствии со своими должностными обязанностями). В случае отсутствия ведущего преподавателя аттестационные испытания проводятся преподавателем, назначенным письменным распоряжением заведующим кафедрой.

Инвалиды и лица с ограниченными возможностями здоровья, допускаются на аттестационные испытания в сопровождении ассистентов-сопровождающих.

- Во время аттестационных испытаний обучающиеся могут пользоваться программой учебной дисциплины, а также с разрешения преподавателя справочной и нормативной литературой, калькуляторами.

- Время подготовки ответа при сдаче зачета/экзамена в устной форме должно составлять не менее 20/30 минут соответственно, (по желанию обучающегося ответ может быть досрочным). Время ответа – не более 15 минут.

- Оценка результатов устного аттестационного испытания объявляется обучающимся в день его проведения. При проведении письменных аттестационных испытаний или компьютерного тестирования – в день их проведения или не позднее следующего рабочего дня после их проведения.

- Результаты выполнения аттестационных испытаний, проводимых в письменной форме, форме итоговой контрольной работы или компьютерного тестирования, должны быть объявлены обучающимся и выставлены в зачётные книжки не позднее следующего рабочего дня после их проведения.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Камчатский государственный технический университет»
Мореходный факультет
Кафедра «Энергетические установки и электрооборудование судов»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методические указания к курсовой работе
для студентов,
обучающихся по направлению подготовки 13.03.02
«Электроэнергетика и электротехника»
профиль «Электрооборудование и
автоматика судов»
заочной формы обучения

Петропавловск-Камчатский

2024

Белов Олег Александрович, к.т.н., доцент кафедры ЭУЭС

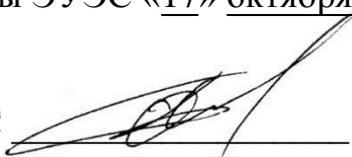
Теоретические основы электротехники: методические указания к курсовой работе по дисциплине для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электрооборудование и автоматика судов» заочной формы обучения / О.А. Белов – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2024. – с.60

Методические указания к курсовой работе составлены в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электрооборудование и автоматика судов», утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 28 февраля 2018 г. № 144 (уровень бакалавриат).

Обсуждены:

на заседании кафедры ЭУЭС «17» октября 2024 г., протокол № 4

Зав. кафедрой ЭУЭС



О.А. Белов

Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Теоретические основы электротехники» рассмотрены и утверждены на заседании УМС протокол № 2 от «02» октября 2024 г.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Курсовая работа студентов (КРС) по дисциплине «Теоретические основы электротехники» является важной составляющей частью подготовки студентов по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электрооборудование и автоматика судов» и выполняется в соответствии с ФГОС ВО. Основной целью КРС является:

- развитие навыков ведения самостоятельной работы;
- приобретение опыта систематизации полученных результатов исследований, формулировку новых выводов и предложений как результатов выполнения работы;
- развитие умения использовать научно-техническую литературу и нормативно-методические материалы в практической деятельности;
- приобретение опыта публичной защиты результатов самостоятельной работы.

В соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электрооборудование и автоматика судов» изучение дисциплины «Теоретические основы электротехники» направлено на формирование у выпускника следующих профессиональных компетенций:

- способность производить оценку технического состояния электрооборудования (**ПК-1**);
- способность обосновывать планы и программы технического обслуживания и ремонта оборудования электрических сетей (**ПК-2**).

1.2 В результате изучения дисциплины студент должен знать:

- нормальные, аварийные, послеаварийные и ремонтные режимы работы отдельных воздушных и кабельных линий электропередачи, допустимые перегрузки по току и температурам воздушных и кабельных линий электропередачи;
- марки, конструктивное исполнение кабелей; основы трудового законодательства Российской Федерации в объеме, необходимом для выполнения трудовых обязанностей;
- передовой производственный опыт организации эксплуатации и ремонта линий электропередачи;
- порядок сдачи в ремонт и приемки из ремонта кабельных линий электропередачи;
- правила пользования инструментом и приспособлениями, применяемыми при ремонте и монтаже энергетического оборудования;
- правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: техническое обслуживание и ремонт силовых кабелей; технические

- характеристики, конструктивные особенности основного оборудования и сооружений воздушных и кабельных линий;
- правила технической эксплуатации электрических станций и сетей в части оборудования подстанций электрических сетей;
 - правила эксплуатации и организации ремонта электрических сетей;
 - правила устройства электроустановок;
 - порядок и методы планирования работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования подстанций электрических сетей;
 - порядок организации обеспечения производства ремонтов оборудования подстанций электрических сетей материально-техническими ресурсами;
 - нормы и требования, стандарты по испытаниям оборудования подстанций электрических сетей, пусконаладке;
 - методы анализа качественных показателей работы оборудования подстанций электрических сетей;
 - порядок вывода оборудования подстанции в ремонт и оформления нарядов-допусков для выполнения на них работ;
 - технологию производства ремонтных работ оборудования подстанций электрических сетей;
 - основы экономики и организации производства, труда и управления в энергетике.

1.3. В результате изучения дисциплины студент должен уметь:

- вести техническую и отчетную документацию;
- выявлять дефекты на кабельных линиях электропередачи;
- применять справочные материалы, анализировать научно-техническую информацию в области эксплуатации кабельных линий электропередачи;
- применять автоматизированные системы мониторинга и диагностики кабельных линий;
- работать с текстовыми редакторами, электронными таблицами, электронной почтой и браузерами, специализированными компьютерными программами;
- анализировать и прогнозировать ситуацию по техническому состоянию и ходе ремонта оборудования подстанций электрических сетей;
- оценивать состояние техники безопасности на подстанциях электрических сетей;
- оценивать качество произведенных работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования подстанций электрических сетей;
- применять справочные материалы по техническому обслуживанию и ремонту оборудования подстанций электрических сетей;
- проводить техническое освидетельствование оборудования подстанций электрических сетей;

- планировать производственную деятельность, ремонты оборудования подстанций электрических сетей.

1.4. В результате изучения дисциплины студент должен владеть:

- навыками подготовки, согласования и передачи исполнителям ремонта утвержденных дефектных ведомостей, проектов проведения работ, карт организации труда и технологической ремонтной документации, необходимой для производства работ на закрепленном оборудовании;
- подготовки статистической отчетности в соответствии с утвержденным перечнем;
- проведения тренировок, занятий по отработке действий персонала при чрезвычайных ситуациях, обучению безопасным приемам и методам труда, и оказанию первой помощи пострадавшим;
- сбора и анализа информации об отказах новой техники и электрооборудования;
- навыками подготовки проектов планов-графиков и программ технического обслуживания и ремонта оборудования подстанций электрических сетей;
- составления заявок на оборудование, запасные части, материалы, инструмент, защитные средства, приспособления, механизмы;
- составления планов мероприятий по подготовке к особым условиям работы по техническому обслуживанию и ремонту оборудования подстанций электрических сетей.

2. ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина теоретические основы электротехники (ТОЭ) является базовой для изучения целого ряда взаимосвязанных дисциплин при подготовке инженеров-электромехаников таких как: электрические машины, электрические аппараты, электроника, электрооборудование и автоматика морских судов, теория автоматического управления (ТАУ) и др.

Целью данной курсовой работы является получение необходимых расчетов различных видов электрических цепей постоянного и переменного тока.

Будущие специалисты должны уметь правильно ориентироваться в выборе методов и подходов при решении задач, уметь анализировать полученные результаты.

При этом, необходимо не только безошибочно выбрать рациональный метод решения задач, но и знать, как его необходимо применить. Рациональность в данном случае подразумевает минимизацию количества решаемых уравнений.

Кроме того, необходимо знать соответствующий математический аппарат и уметь его правильно применять. Также необходимо помнить, что применение основных законов теории электрических цепей (законы Ома и Кирхгофа) при расчете электрических цепей различных типов, например, постоянного и переменного тока имеет свои специфические особенности.

Большую помощь при расчете цепей не только постоянного и переменного тока может оказать применение современных средств вычислительной техники.

Изучение курса ТОЭ требует систематической работы над учебной литературой, выполнения лабораторного практикума и решения задач.

3. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЙ

Изучение курса ТОЭ требует систематической работы над учебной литературой, выполнения лабораторного практикума и решения задач.

При решении задач следует руководствоваться следующими правилами:

1. Каждый студент решает задачи в соответствии со своим вариантом (о выборе варианта см. ниже).

2. Перед тем, как приступить к решению задачи, необходимо изучить методы расчета и физические законы, положенные в основу решения.

3. По каждой задаче необходимо привести ее условие и расчетную схему, на которой указать принимаемые положительные направления искомых токов и напряжений.

4. Решение задачи следует сопровождать краткими пояснениями. Искомая величина вначале определяется в буквенном выражении, затем подставляются числовые значения величин, приводятся основные этапы преобразований и конечный результат, который должен ясно выделяться из общего текста с обязательным указанием его размерности.

5. При вычерчивании электрических схем следует пользоваться обозначениями, предусмотренными ГОСТом и требованиями ЕСКД. Схемы допускается вычерчивать «от руки».

6. При построении графиков на осях координат следует наносить равномерные шкалы для откладываемых величин и их размерности. Если в одной и той же системе строится несколько графиков, то для каждой изображаемой величины необходимо выбрать свой масштаб и соответствующим образом обозначить графики.

7. Если одна и та же задача решается несколькими методами, то во всех случаях одни и те же величины должны иметь одинаковые обозначения.

8. Для оформления задач необходимо завести ученическую тетрадь, на обложке которой указать группу, фамилию и инициалы студента, номер варианта и номера выполненных задач.

Выбор варианта задания: Все задачи настоящих указаний составлены в 100 вариантах. Если номер варианта не указан преподавателем индивидуально для каждого студента, то он выбирается следующим образом. Для студентов группы «а» в потоке номером варианта является порядковый номер его фамилии в групповом журнале. Для студентов групп «б», «в», «г» и т.д. номер варианта получается путем добавления к порядковому номеру в групповом журнале чисел 30, 60, 90 и т.д., и номером варианта являются две последние цифры полученного числа. При этом следует учесть, что если в задаче приводятся 10 схем, то первая цифра варианта соответствует номеру варианта числовых данных, а вторая – номеру схемы. Например, если порядковый номер студента группы равен 23, то номер его варианта будет 83. В этом случае он должен вести расчет схемы 3 при восьмом варианте числовых данных.

1. РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для схемы рис.1 требуется:

- 1) составить уравнения по законам Кирхгофа для расчета токов во всех ветвях (решать их не следует);
- 2) рассчитать токи методом контурных токов;
- 3) определить токи методом узловых потенциалов;
- 4) выполнить расчет тока в ветви, указанной в таблице вариантов, методом эквивалентного генератора (МЭГ);
- 5) проверить баланс мощностей;
- 6) построить потенциальную диаграмму для любого контура, включающего в себя ветвь с источником ЭДС.

Таблица вариантов к задаче 1

Первая цифра варианта	r_1 , Ом	r_2 , Ом	r_3 , Ом	r_4 , Ом	r_5 , Ом	E , В	J , А	Определить ток МЭГ в
0	12	12	12	6	6	120	2	r_3
1	12	12	24	24	12	140	1	r_4
2	15	10	10	8	8	80	3	r_2
3	20	20	18	9	9	60	2	r_5
4	10	10	6	12	12	48	1	r_1
5	16	8	16	5	5	36	2	r_1
6	40	40	20	5	15	80	2	r_5
7	20	20	40	20	20	48	2	r_3
8	10	20	20	10	10	20	1	r_4
9	40	60	40	20	20	44	2	r_2

Указание: Если количество неизвестных и уравнений, входящих в систему и описывающих цепь, *не превышает трех*, то решение таких систем более рационально выполнять с помощью составления *определителей третьего порядка*. Составление определителей и способы их решения представлены в приложении А. При этом решение возможно с помощью микрокалькуляторов.

Если количество уравнений *превышает три*, то здесь уже необходимо наличие вычислительной техники.

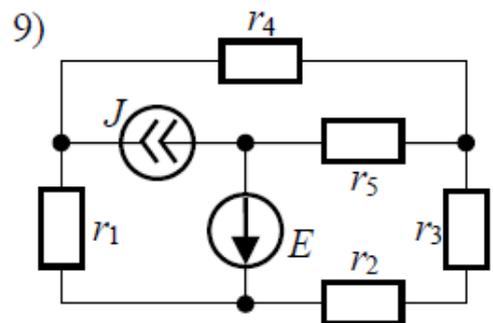
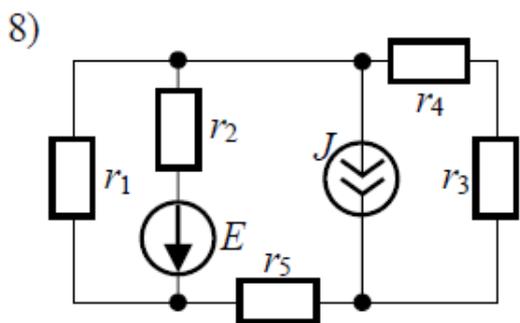
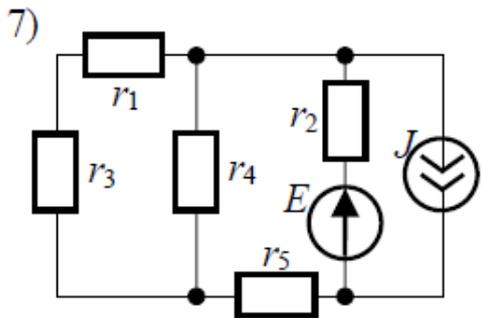
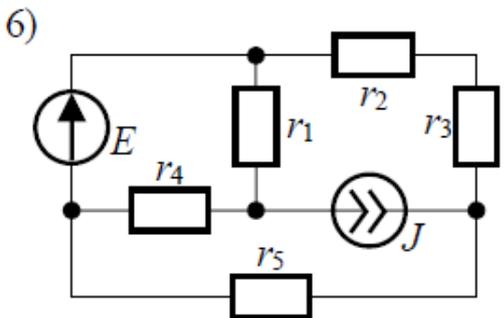
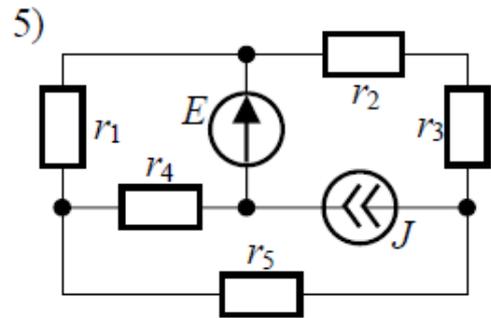
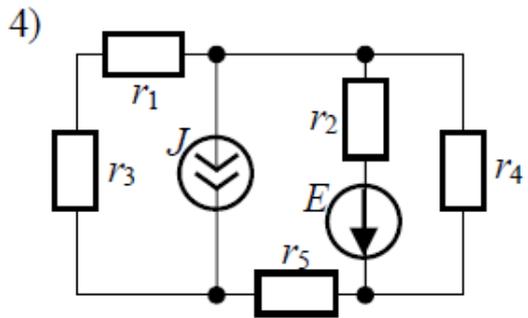
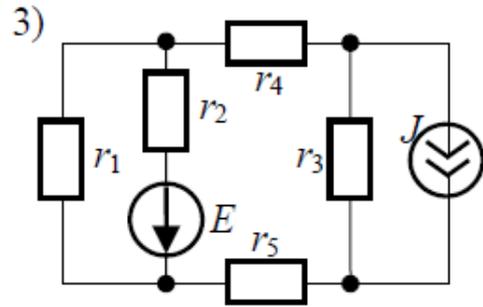
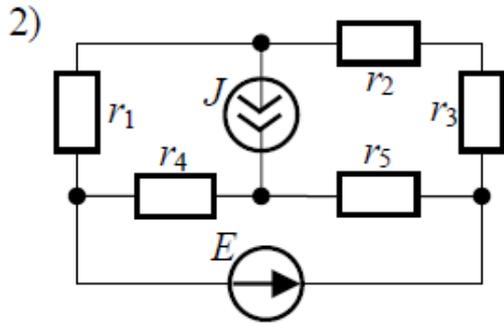
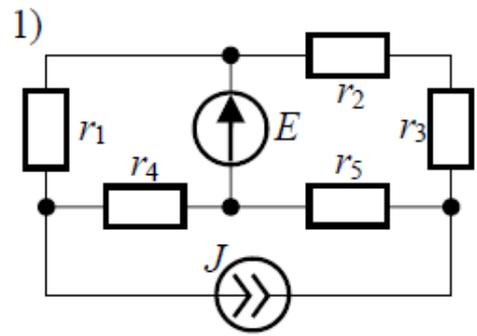
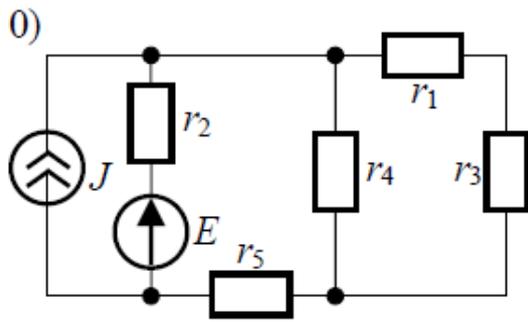


Рисунок 1 – Схема сложной электрической цепи постоянного тока

Типовой пример выполнения работы

«Расчет сложных цепей постоянного тока»

Решение

1. Начертим схему электрической цепи (рис.1.1).

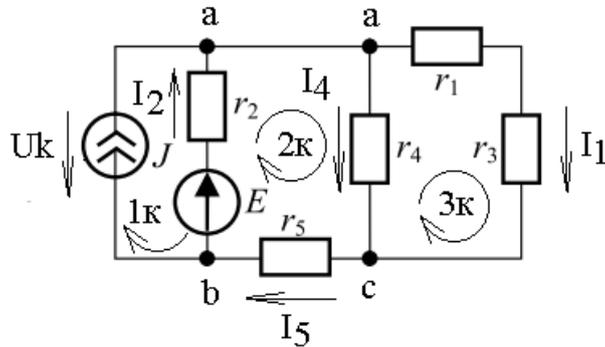


Рисунок 1.1 – Схема электрической цепи для ее расчета по методу законов Кирхгофа

2. Выбираем произвольно направления токов в ветвях.

3. Выполняем анализ электрической цепи: цепь – сложная, узлов $y=3$; ветвей $v=5$; ветвей с известным током $v_T=1$, число контуров электрической цепи $N_{\text{конт}}=v-(y-1)=5-(3-1)=3$ контура. 1к – 1-й контур; 2к – 2-й контур; 3к – 3-й контур.

4. Определяем количество уравнений, которые необходимо составить по методу законов Кирхгофа (МЗК) т.е. по I и II законам Кирхгофа:

$$N_I = y - 1 = 3 - 1 = 2 \text{ уравнения}; \quad N_{II} = v - (y - 1) - v_T = 5 - (3 - 1) - 1 = 2 \text{ уравнения}.$$

Таким образом, необходимо составить 4 уравнения.

5. Составим уравнения для расчета цепи по МЗК:

$$\begin{cases} J + I_2 - I_1 - I_4 = 0; \\ I_1 + I_4 - I_5 = 0; \\ I_2 R_2 + I_4 R_4 + I_5 R_5 = E; \\ I_1 (R_1 + R_3) - I_4 R_4 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Подставляем в систему уравнений (1) числовые значения и получаем систему уравнений (2).

$$\begin{cases} J - I_1 + I_2 - I_4 = -2; \\ I_1 + I_4 - I_5 = 0; \\ 20I_2 + 9I_4 + 9I_5 = 60; \\ 38I_1 - 9I_4 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Решением системы уравнений (2) можно получить значения токов ветвях: $I_1, I_2; I_4$ и I_5 .

6. Выполним расчет электрической цепи по методу контурных токов. При этом, достаточно уравнений, составленных по II закону Кирхгофа:

$$N_{\text{МКТ}} = \nu - (y - 1) - \nu_T = 5 - (3 - 1) - 1 = 2 \text{ уравнения} .$$

Вводим т.н. контурные токи I_I и I_{II} . Схема цепи (рис.1.1) преобразуется к виду (рис.1.2). Также в качестве контурного тока принимаем ток $I_{III}=J=2\text{A}$.

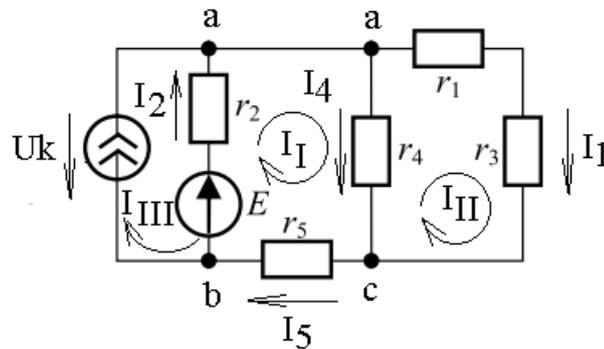


Рисунок 1.2 - Схема электрической цепи для ее расчета по методу контурных токов

Записываем систему уравнений:

$$\begin{cases} I_I(R_2 + R_4 + R_5) - I_{II} \cdot R_4 - I_{III} \cdot R_2 = E; \\ I_{II}(R_1 + R_3 + R_4) - I_I \cdot R_4 = 0. \end{cases} \quad (3).$$

Подставляем в систему уравнений (3) числовые значения и получаем систему уравнений (4).

$$\begin{cases} 38I_I - 9I_{II} = 100; \\ -9I_I + 47I_{II} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решением системы уравнений на микрокалькуляторе получаем значения контурных токов: $I_I = 2,757\text{A}; I_{II} = 0,5279\text{A}$.

По методу наложения определяем значения токов в ветвях:

$I_1 = I_{II} = 0,5279\text{A}; I_5 = I_I = 2,757\text{A}; I_2 = I_I - I_{III} = 2,757 - 2 = 0,757\text{A}; I_4 = I_I - I_{II} = 2,757 - 0,5279 = 2,229\text{A}$.

7. Проверку правильности расчетов выполняем путем составления баланса мощностей:

$$\sum P_{\text{пр}} = I_1^2 \cdot (R_1 + R_3) + I_2^2 \cdot R_2 + I_4^2 R_4 + I_3^2 R_5 = 0,5279^2 \cdot 38 + 0,757^2 \cdot 20 + 2,229^2 \cdot 9 + 2,757^2 \cdot 9 = 135,176 \text{ Вт}$$

$$\sum P_{\text{ист}} = E_2 \cdot I_2 + U_K \cdot J = 60 \cdot 0,757 + 44,86 \cdot 2 = 135,14 \text{ Вт}.$$

Значение напряжения источника тока определяем по II закону Кирхгофа для 3 –го контура:

$$U_K + I_2 \cdot R_2 = E. \text{ Откуда: } U_K = E - I_2 \cdot R_2 = 60 - 0,757 \cdot 20 = 44,86 \text{ В}.$$

Сравнение значений, полученных в п.7 свидетельствует о том, что баланс мощностей в цепи соблюдается.

8. Выполним расчет цепи (рис.1.1) по методу узловых потенциалов. Схема цепи (рис.1.1) при этом преобразуется к виду (рис.1.3).

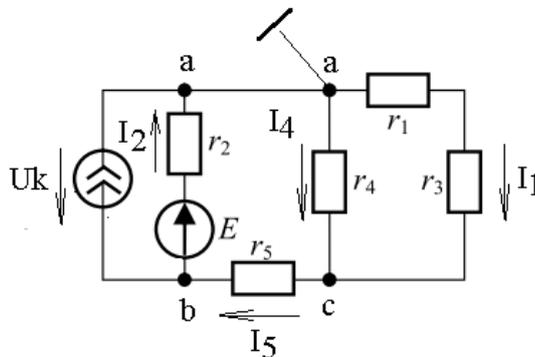


Рисунок 1.3 - Схема электрической цепи для ее расчета по методу узловых потенциалов

Заземляем потенциал узла «а» т.е. $\varphi_a=0$.

Количество уравнений, которые необходимо составить по методу узловых потенциалов (МУП) определяется:

$$N_{\text{МУП}} = y - 1 = 3 - 1 = 2 \text{ уравнения}$$

$$\begin{cases} \varphi_B \cdot \left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_2} \right) - \varphi_C \cdot \frac{1}{R_5} = -\frac{E}{R_2} - J; \\ \varphi_C \cdot \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{(R_1 + R_3)} + \frac{1}{R_5} \right) - \varphi_B \cdot \frac{1}{R_5} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Подставляем в систему уравнений (5) числовые значения и получаем систему уравнений (6).

$$\begin{cases} 0,161\varphi_B - 0,111\varphi_C = -5; \\ -0,111\varphi_B + 0,248\varphi_C = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Решением системы уравнений (6) получаем значения потенциалов узлов:
 $\varphi_B = -44,916B$; $\varphi_C = -20,1B$.

Значения токов в ветвях определяем по закону Ома:

$$I_1 = \frac{\varphi_a - \varphi_C}{(R_1 + R_3)} = \frac{0 - (-20,1)}{38} = 0,5289A; \quad I_4 = \frac{\varphi_a - \varphi_C}{R_4} = \frac{0 - (-20,1)}{9} = 2,223A;$$

$$I_5 = \frac{\varphi_C - \varphi_B}{R_5} = \frac{-20,1 - (-44,916)}{9} = 2,757A; \quad I_2 = \frac{\varphi_B - \varphi_a + E}{R_2} = \frac{-44,916 + 60}{20} = 0,754A.$$

9. Выполним расчет тока в ветви R_5 методом эквивалентного генератора (МЭГ). Схема цепи (рис.1.1) при этом преобразуется к виду (рис.1.4).

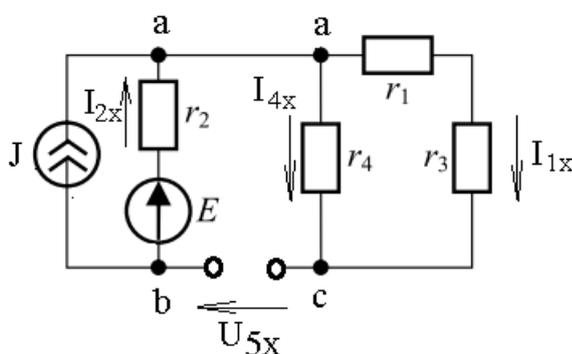


Рисунок 1.4 - Схема электрической цепи для ее расчета по методу эквивалентного генератора

Размыкаем ветвь с резистором R_5 и по току вводим напряжение холостого хода U_{5x} . Оставшаяся часть цепи (рис.1.4) сложная.

По II закону Кирхгофа составим уравнение:

$$U_{5x} + I_{2x} \cdot R_2 + I_{4x} \cdot R_4 = E.$$

$$\text{Откуда: } U_{5x} = E - I_{2x} \cdot R_2 - I_{4x} \cdot R_4 = 60 - (-2) \cdot 20 - 2 \cdot 9 = 82B.$$

Значения токов I_{2x} и I_{4x} определяем из рис.1.5.

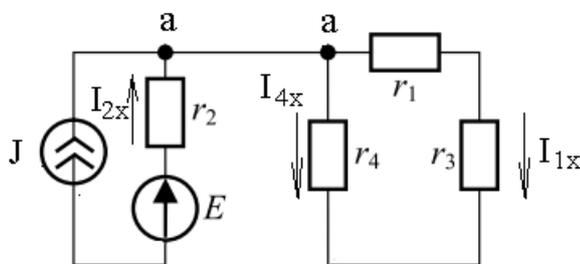


Рисунок 1.5 – К определению токов I_{2x} и I_{4x}

Из рис.1.5 следует, что значения токов $I_{2x} = -2A$; $I_{4x} = 2A$.

Определяем величину сопротивления R_{BX} . Схема цепи (рис.1.4) при этом преобразуется к виду (рис.1.6).

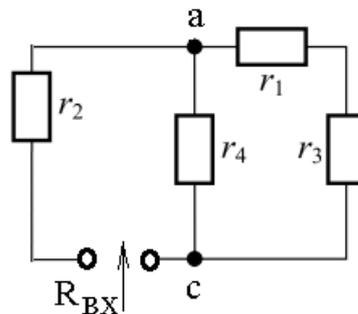


Рисунок 1.6 – Схема цепи для определения входного сопротивления R_{BX}

$$R_{BX} = R_2 + \frac{R_4 \cdot (R_1 + R_3)}{R_4 + (R_1 + R_3)} = 20 + \frac{9 \cdot 38}{9 + 38} = 27,2766 \text{ Ом.}$$

Определяем значение искомого тока:

$$I_5 = \frac{U_{5X}}{R_{BX} + R_5} = \frac{82}{27,2766 + 9} = 2,26 \text{ А.}$$

10. Выполним расчет электрической цепи (рис.1.1) методом наложения (МН). Считаем, что к цепи подключен только источник тока J . Схема цепи (рис.1.1) при этом преобразуется к виду (рис.1.7).

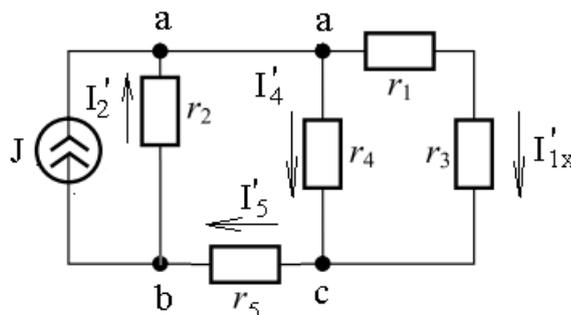


Рисунок 1.7 – Схема цепи при действии в ней только источника тока

Резисторы R_1 и R_3 соединены последовательно - заменим их общим резистором:

$$R_{13} = R_1 + R_3 = 20 + 18 = 38 \text{ Ом.}$$

Резисторы R_{13} и R_4 соединены параллельно - заменим их общим резистором:

$$R_{13,4} = \frac{R_{13} \cdot R_4}{R_{13} + R_4} = \frac{38 \cdot 9}{38 + 9} = 7,2766 \text{ Ом.}$$

Резисторы $R_{13,4}$ и R_5 соединены последовательно – заменим их общим резистором:

$$R_{13,4,5} = R_{13,4} + R_5 = 7,2766 + 9 = 16,2766 \text{ Ом.}$$

По правилу разброса токов параллельные ветви получаем значение тока в ветви с резистором $R_{13,4,5}$.

$$I'_5 = J \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_{13,4,5}} = 2 \cdot \frac{20}{16,2766 + 20} = 1,1 \text{ А}$$

Для узла «b» по I закону Кирхгофа:

$$I'_5 - I'_2 - J = 0$$

$$I'_2 = I'_5 - J = 1,1 - 2 = -0,9 \text{ А}$$

Откуда:

По правилу разброса токов в параллельные ветви имеем:

$$I'_1 = I'_5 \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_{13}} = 1,1 \cdot \frac{9}{9 + 38} = 0,21 \text{ А}; \quad I'_4 = I'_5 \cdot \frac{R_{13}}{R_4 + R_{13}} = 1,1 \cdot \frac{38}{9 + 38} = 0,889 \text{ А}$$

11. Считаю, что к цепи подключен только источник ЭДС E . Схема цепи (рис.1.1) при этом преобразуется к виду (рис.1.8).

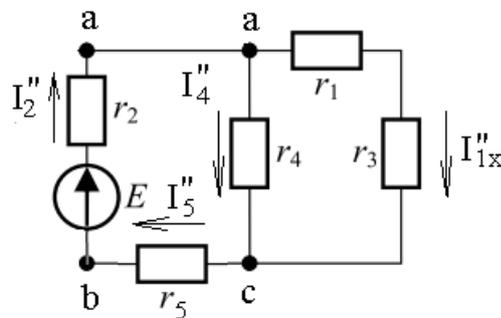


Рисунок 1.8 – Схема цепи при действии в ней только источника ЭДС

Резисторы R_2 и R_5 соединены последовательно - заменим их общим резистором:

$$R_{25} = R_2 + R_5 = 20 + 9 = 29 \text{ Ом.}$$

Резисторы R_{13} и R_4 соединены параллельно - заменим их общим резистором:

$$R_{13,4} = \frac{R_{13} \cdot R_4}{R_{13} + R_4} = \frac{38 \cdot 9}{38 + 9} = 7,2766 \text{ Ом.}$$

Определяем эквивалентное сопротивление:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_{13,4} + R_{25} = 7,2766 + 29 = 36,2766 \text{ Ом.}$$

По закону Ома:

$$I_2'' = \frac{E}{R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{60}{36,2766} = 1,654 \text{ А}$$

По правилу разброса токов параллельные ветви получаем значение тока в ветви с резистором R_4 :

$$I_4'' = I_2'' \cdot \frac{R_{13}}{R_4 + R_{13}} = 1,654 \cdot \frac{38}{9 + 38} = 1,337 \text{ А}$$

По I закону Кирхгофа получаем:

$$I_1'' = I_2'' - I_4'' = 1,654 - 1,337 = 0,317 \text{ А}; I_5'' = I_2'' = 1,654 \text{ А.}$$

Определяем значения токов в ветвях:

$$I_1 = I_1' + I_1'' = 0,21 + 0,317 = 0,527 \text{ А}; I_2 = I_2' + I_2'' = -0,9 + 1,654 = 0,754 \text{ А};$$

$$I_4 = I_4' + I_4'' = 0,889 + 1,337 = 2,226 \text{ А}; I_5 = I_5' + I_5'' = 1,1 + 1,654 = 2,754 \text{ А.}$$

12. Для сравнения результаты расчетов, полученные по разным методам расчета сведем в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнение результатов расчета по различным методам.

Метод	Токи			
	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_4, \text{А}$	$I_5, \text{А}$
МКТ	0,5279	0,757	2,229	2,757

МУП	0,5289	0,754	2,238	2,757
МЭГ				2,26
МН	0,527	0,754	2,226	2,754

Анализ табл.1 показывает, что значения, полученные при расчетах разными методами практически ничем не отличаются. Из полученных значений несколько отличается значение тока, полученное при расчете по МЭГ.

13. Построим потенциальную диаграмму для контура, включающего в себя ветвь с источником ЭДС. Схема цепи (рис.1) при этом преобразуется к виду (рис.1.9).

Заземляем узел «b». $\varphi_b = 0$. Для представленного на рис.1.9 контура определяем по закону Ома значение тока в цепи:

$$I = \frac{E}{R_2 + R_4 + R_5} = \frac{60}{20 + 9 + 9} = 1,57A$$

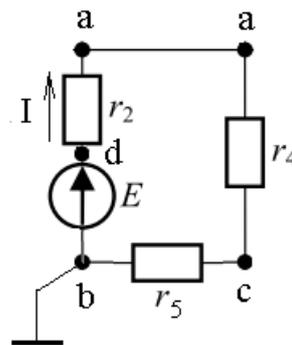


Рисунок 1.9 – Схема цепи для построения потенциальной диаграммы

Определяем значение потенциала $\varphi_d = +E = 60V$.

Значение потенциала $\varphi_a = \varphi_d - I \cdot R_2 = 60 - 1,57 \cdot 20 = 28,6V$.

Значение потенциала $\varphi_c = \varphi_a - I \cdot R_4 = 28,6 - 1,57 \cdot 9 = 14,47V$.

Значение потенциала $\varphi_b = \varphi_c - I \cdot R_5 = 14,47 - 1,57 \cdot 9 = 0V$.

По полученным данным построим потенциальную диаграмму (рис.1.10).

Принимаем масштабы: потенциалов - $m_\varphi = 10V/См$; потенциалов - $m_R = 2Ом/См$

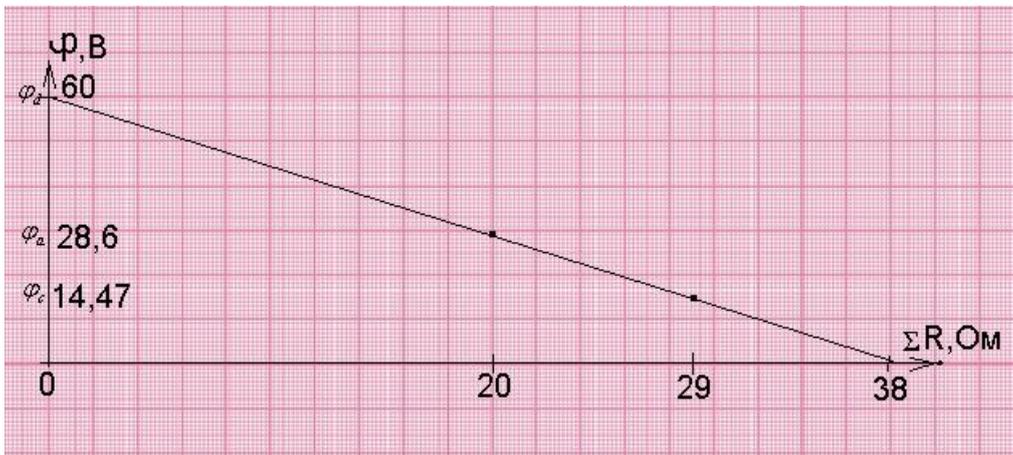


Рисунок 1.10 – Потенциальная диаграмма

2. РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ОДНОФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Исходные данные

К 2-х проводной ЛЭП, питающейся от генератора G с частотой 50Гц (рис.2.1), подключаются параллельно через выключатели $S_1...S_6$ приемники $\Pi_1... \Pi_6$ (табл.2.1).

Напряжение на зажимах генератора U_1 (в начале ЛЭП) измеряется вольтметром pV_1 , а на зажимах приемников - pV_2 . Для измерения токов каждого приемника применяются амперметры $pA_1...pA_6$, а для генератора – pA_7 .

Варианты заданных значений напряжения U_2 , сопротивлений проводников ЛЭП R_l и X_l , замкнутых выключателей и параметров приемников выбираются в соответствии с табл.2.1 и 2.2. Генератор считать идеальным и его сопротивление принять равным нулю.

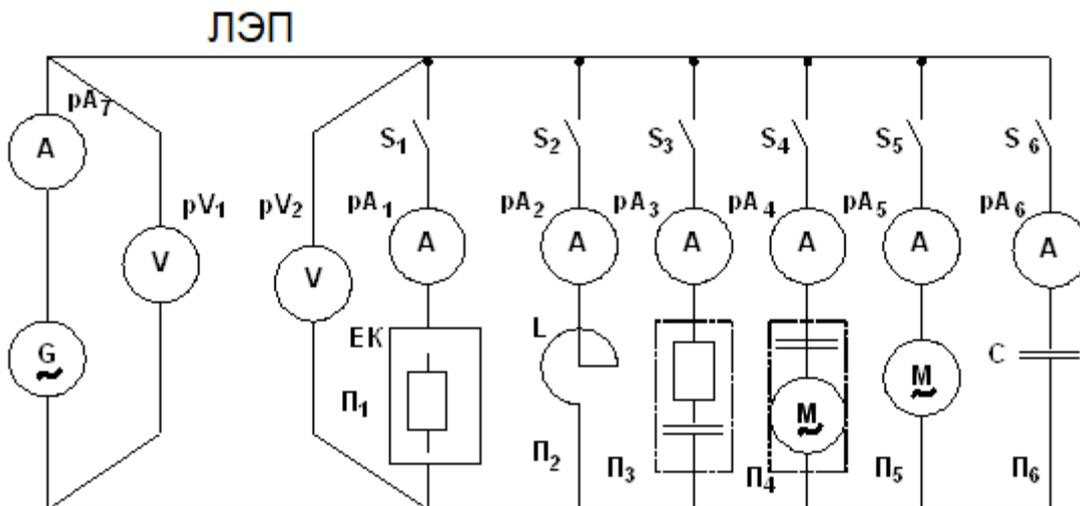


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема подключения приемников

Таблица 2.1 - Параметры приемников электроэнергии

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	Тип приемника и параметры его последовательной схемы замещения, Ом									
	П ₁ , нагревательная печь	П ₂ , реактор	П ₃ , активно-емкостный фильтр		П ₄ , однофазный конденсаторный электродвигатель			П ₅ , однофазный электродвигатель		П ₆ , батарея конденсаторов
			R ₁	X ₂	R ₃	X _{C3}	R ₄	X _{L4}	X _{C4}	
0	100	100	80	60	100	100	100	80	60	100
1	60	80	40	30	40	40	70	40	30	83,3
2	50	50	40	30	40	40	10	30	40	100
3	100	70	70,7	70,7	50	50	50	60	80	125
4	100	80	60	80	80	40	100	70,7	70,7	100
5	40	100	80	60	80	100	100	32	24	66,6
6	40	40	24	32	24	40	72	80	60	20
7	40	40	32	24	24	72	40	60	80	125
8	50	30	32	24	12	16	32	16	24	30
9	20	20	15	20	16	48	48	32	24	66,6
m	80	275	50	50	100	400	400	100	100	200

Таблица 2.2 - Параметры схемы для рис. 2.1

Наименование	Последняя цифра номера зачетной книжки										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	n
Номера замкнутых выключателей	1	1	1	1	2	2	2	3	3	4	2
	2	2	2	2	3	3	3	4	4	5	4
	3	4	5	6	4	5	6	5	6	6	5
Напряжение U ₂ , В	127	220	380	660	127	220	380	660	127	380	220
Активное сопротивление проводников линии R _л , Ом	1	5	3	2	1	5	3	2	1	3	6
Индуктивное сопротивление проводников линии X _л , Ом	3	15	9	6	3	15	9	6	3	9	18

2. Необходимо.

Выполнить расчет схемы в соответствии с указаниями преподавателя:

а) методом разложения на токов приемников на активно-реактивные составляющие;

б) символическим методом.

Для своего варианта необходимо:

1. Начертить принципиальную схему (ветви с разомкнутыми выключателями не чертить; нумерацию в соответствии с рис.2.1 не менять).

2. Начертить эквивалентную схему цепи. На схеме нанести условно-положительные направления ЭДС источников, напряжений и токов, а также падения напряжения на сопротивлениях ЛЭП.

3. Определить ток каждого приемника, т.е. показания амперметров pA₁...pA₆.

4. Определить ток ЛЭП (показания амперметра pA_7).
5. По току в ЛЭП и напряжению в конце ЛЭП U_2 заменить группу приемников эквивалентным приемником.
6. Определить потери напряжения в ЛЭП ΔU_L .
7. Определить напряжение на зажимах генератора U_1 (показания вольтметра pV_1).
8. Построить для заданной схемы (в масштабе) векторную диаграмму с изображением всех токов и напряжений. Выполнить анализ диаграммы: определить угол сдвига фаз между напряжениями U_1, U_2 и общим током, а также потери напряжения ($U_1 - U_2$).
9. Определить ветвь схемы в которой, в которой имеет место резонанс напряжений. Определить напряжения на ее элементах.
10. Определить ветвь схемы в которой имеет место резонанс токов.
11. Определить активную, реактивную и полную мощности каждого приемника и эквивалентного приемника.
12. Составить баланс активных и реактивных мощностей приемников. Оценить относительную погрешность расчетов.

Типовой пример выполнения работы

«Расчет разветвленных цепей переменного тока»

Пусть две последние цифры номера зачетной книжки m и n . В этом случае замкнуты выключатели S_2, S_4, S_5, S_6 . Ниже приводится пример расчета и оформления работы для данного варианта.

Задание

Принципиальная схема представлена на рис.2.1 (ветви, выключатели которых по условию разомкнуты, на схеме замещения (рис.2.2) не изображать: нумерацию сохранить в соответствии с рис.2.1).

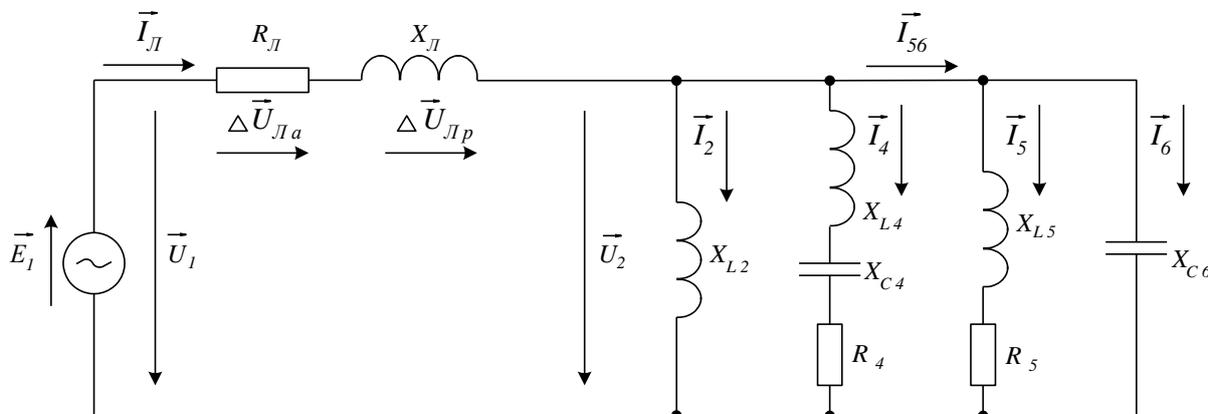


Рисунок 2.2 – Схема замещения цепи

Дано: $U_2=220 \text{ В}; X_{L2}=275 \text{ Ом}; R_4=100 \text{ Ом}; X_{L4}=400 \text{ Ом}; X_{C4}=400 \text{ Ом}; R_5=100 \text{ Ом}; X_{L5}=100 \text{ Ом}; X_{C6}=200 \text{ Ом}; R_L=6 \text{ Ом}; X_L=18 \text{ Ом}.$

Решение

А. Метод разложения токов приемников на активно-реактивные составляющие.

2.1 Чертим схему замещения цепи (рис.2.2). Активные и индуктивные сопротивления двух проводов линии заменяем эквивалентным активным R_l и индуктивным X_l сопротивлениями. Задаемся условно-положительными направлениями ЭДС E_1 , напряжений U_1, U_2 и ΔU_l , токов I_2, I_4, I_5, I_6 и I_l .

УКАЗАНИЕ: На переменном токе ЭДС, напряжения и токи изменяют свои направления дважды за период. Одно из направлений ЭДС внутри источника принимается за условно-положительное и указывается стрелкой (рис.2.2). По отношению к этому направлению устанавливаются условно-положительные направления напряжений и токов по правилам, установленным для цепей постоянного тока: напряжение источника U_1 принимается противоположным к E_1 , ток I_l – совпадает с ЭДС источника, направления напряжений и токов на приемниках электроэнергии совпадают. При таком подходе для переменного тока сохраняются те же правила для определения источников и приемников электроэнергии, как и для постоянного тока (если направления напряжения и тока совпадают, ветвь – приемник электроэнергии, если они противоположны – ветвь источник электроэнергии).

Риска над знаком каждой из величин указывает на то, что на векторных диаграммах они изображаются векторами.

2.2 Определяем токи каждого приемника, т.е. токи в параллельных ветвях схемы.

Полные сопротивления ветвей:

$$Z_2 = X_{L2} = 275 \text{ Ом};$$

$$Z_4 = \sqrt{R_4^2 + (X_{L4} - X_{C4})^2} = \sqrt{100^2 + (400 - 400)^2} = 100 \text{ Ом};$$

$$Z_5 = \sqrt{R_5^2 + X_{L5}^2} = \sqrt{100^2 + 100^2} = 141 \text{ Ом}; \quad Z_6 = X_{C6} = 200 \text{ Ом};$$

Токи приемников:

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{220}{275} = 0.8 \text{ А}; \quad I_4 = \frac{U_2}{Z_4} = \frac{220}{100} = 2.2 \text{ А};$$

$$I_5 = \frac{U_2}{Z_5} = \frac{220}{141} = 1.56 \text{ А}; \quad I_6 = \frac{U_2}{Z_6} = \frac{220}{200} = 1.1 \text{ А};$$

Для упрощения построений этих токов на векторной диаграмме, вычислим их активные и реактивные составляющие.

С этой целью определим $\cos \varphi$ и $\sin \varphi$ для каждой ветви приемника:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_2 &= \frac{R_2}{Z_2} = \frac{0}{275} = 0; & \sin \varphi_2 &= \frac{X_{L2}}{Z_2} = \frac{275}{275} = 1; \\ \cos \varphi_4 &= \frac{R_4}{Z_4} = \frac{100}{100} = 1; & \sin \varphi_4 &= \frac{X_{L4} - X_{C4}}{Z_4} = \frac{400 - 400}{100} = 0; \\ \cos \varphi_5 &= \frac{R_5}{Z_5} = \frac{100}{141} = 0.707; & \sin \varphi_5 &= \frac{X_{L5}}{Z_5} = \frac{100}{141} = 0.707; \\ \cos \varphi_6 &= \frac{R_6}{Z_6} = \frac{0}{200} = 0; & \sin \varphi_6 &= \frac{X_{C6}}{Z_6} = \frac{200}{200} = 1. \end{aligned}$$

Активные и реактивные составляющие токов ветвей:

$$\begin{aligned} I_{2a} &= I_2 \cos \varphi_2 = 0.8 \cdot 0 = 0 \text{ A}; \\ I_{4a} &= I_4 \cos \varphi_4 = 2.2 \cdot 1 = 2.2 \text{ A}; \\ I_{5a} &= I_5 \cos \varphi_5 = 1.56 \cdot 0.707 = 1.1 \text{ A}; \\ I_{6a} &= I_6 \cos \varphi_6 = 1.1 \cdot 0 = 0 \text{ A}; \\ I_{2P} &= I_2 \sin \varphi_2 = 0.8 \cdot 1 = 0.8 \text{ A}; \\ I_{4P} &= I_4 \sin \varphi_4 = 2.2 \cdot 0 = 0 \text{ A}; \\ I_{5P} &= I_5 \sin \varphi_5 = 1.56 \cdot 0.707 = 1.1 \text{ A}; \\ I_{6P} &= I_6 \sin \varphi_6 = 1.1 \cdot 1 = 1.1 \text{ A}; \end{aligned}$$

2.3 Определяем ток в линии I_l :

Общий ток параллельно соединенных ветвей:

$$I_l = \sqrt{(\sum I_a)^2 + (\sum I_P)^2},$$

где $\sum I_a$, $\sum I_P$ - соответственно активная и реактивная составляющие общего тока.

УКАЗАНИЕ: Здесь $\sum I_a$ равен арифметической сумме активных составляющих токов ветвей, а $\sum I_P$ - алгебраической сумме реактивных составляющих ветвей (индуктивные токи берутся со знаком «+», а емкостные – со знаком «-»).

Для данной схемы:

$$I_l = \sqrt{(I_{4a} + I_{5a})^2 + (I_{2P} + I_{5P} - I_{6P})^2} = \sqrt{(2.2 + 1.1)^2 + (0.8 + 1.1 - 1.1)^2} = 3.4 \text{ A}$$

Применяя общий ток приемников I_l и общее для них напряжение U_2 заменим группу приемников одним эквивалентным, сопротивление которого:

$$Z_{\varphi} = \frac{U_2}{I_n} = \frac{220}{3.4} = 6.45 \text{ Ом}$$

Применяя активную $\sum I_a$ и реактивную $\sum I_p$ составляющие, а также общий ток I_n определяем величины $\cos \varphi_{\varphi}$ и $\sin \varphi_{\varphi}$ эквивалентного приемника:

$$\cos \varphi_{\varphi} = \frac{\sum I_a}{I_n} = \frac{3.3}{3.4} = 0.97; \quad \sin \varphi_{\varphi} = \frac{\sum I_p}{I_n} = \frac{0.8}{3.4} = 0.235;$$

Определяем сопротивления эквивалентного приемника:

$$R_{\varphi} = Z_{\varphi} \cos \varphi_{\varphi} = 6.45 \cdot 0.97 = 6.22 \text{ Ом}; \quad X_{\varphi} = Z_{\varphi} \sin \varphi_{\varphi} = 6.45 \cdot 0.235 = 1.52 \text{ Ом}$$

Составляем схему замещения цепи с эквивалентным приемником (рис.2.3). В связи с тем, что в реактивной части общего тока перевешивает индуктивный ток ($\sum I_p > 0$), тогда реактивный ток эквивалентной нагрузки - индуктивный $X_{L\varphi}$.

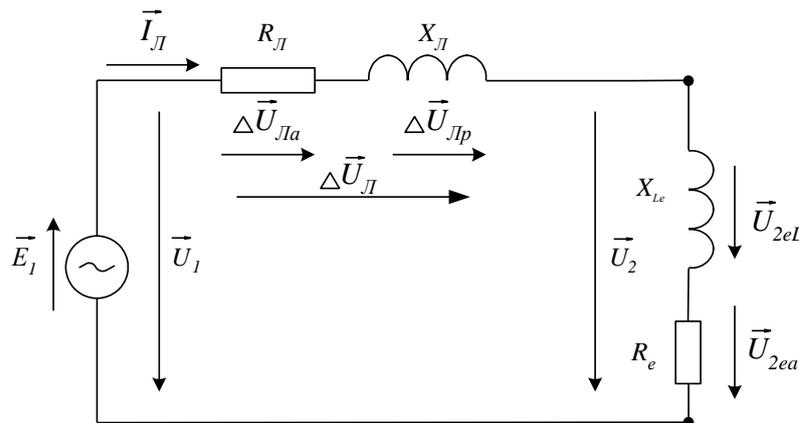


Рисунок 2.3 – Схема цепи при замене параллельного соединения приемников эквивалентным приемником

УКАЗАНИЕ: Если в $\sum I_p$ перевешивают емкостные токи ($\sum I_p < 0$), реактивное сопротивление эквивалентного приемника должно быть емкостным $X_{C\varphi}$.

2.4 Определим падения напряжений в линии ΔU_L .

Активная составляющая падения напряжения в линии:

$$\Delta U_{ла} = I_n R_L = 3.4 \cdot 6 = 20.4 \text{ В}$$

Реактивная составляющая падения напряжения в линии:

$$\Delta U_{лP} = I_{л} X_{л} = 3.4 \cdot 18 = 61.2 \text{ В}$$

Падение напряжения в линии:

$$\Delta U_{л} = \sqrt{\Delta U_{ла}^2 + \Delta U_{лP}^2} = \sqrt{20.4^2 + 61.2^2} = 64.5 \text{ В}$$

2.5 Определяем напряжение на зажимах генератора.

Из схемы (рис.2.3) следует, что напряжение источника определяется векторной суммой:

$$\vec{U}_1 = \Delta \vec{U}_{л} + \vec{U}_2.$$

В состав векторов \vec{U}_2 и $\Delta \vec{U}_{л}$ входят активные и реактивные составляющие напряжений на сопротивлениях эквивалентной последовательной схемы замещения (рис.2.3). При этом, напряжение U_2 состоит из активной $U_{2эa}$ (на сопротивлении $R_{э}$) и реактивной $U_{2эP}$ (сопротивление $X_{э}$) составляющих напряжения, причем:

$$\vec{U}_2 = \vec{U}_{2эa} + \vec{U}_{2эP}$$

Составляющие $U_{2эa}$ и $U_{2эP}$ определяются через U_2 , $\cos \varphi_{э}$ и $\sin \varphi_{э}$:

$$U_{2эa} = U_2 \cdot \cos \varphi_{э} = 220 \cdot 0.97 = 213.4 \text{ В};$$

$$U_{2эP} = U_2 \cdot \sin \varphi_{э} = 220 \cdot 0.235 = 51.7 \text{ В}.$$

Общее напряжение источника эквивалентной последовательной цепи:

$$U_1 = \sqrt{(\sum U_a)^2 + (\sum U_P)^2},$$

где $\sum U_a$, $\sum U_P$ - соответственно активная и реактивная составляющие напряжения источника.

УКАЗАНИЕ: Здесь $\sum U_a$ равно арифметической сумме падений напряжений на активных сопротивлениях последовательной цепи (рис.2.3), а $\sum U_P$ - алгебраической сумме падений напряжений на реактивных сопротивлениях (падения напряжений на индуктивных сопротивлениях принимаются со знаком «+», а на емкостных сопротивлениях – со знаком «-»).

Для схемы рис.2.3 напряжение источника:

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{(U_{2эa} + \Delta U_{ла})^2 + (U_{2эP} + \Delta U_{лP})^2} = \sqrt{(213.4 + 20.4)^2 + (51.7 + 61.2)^2} = \\ &= 259.6 \text{ В} \end{aligned}$$

УКАЗАНИЕ: Если эквивалентная схема (см. рис.2.3) активно-емкостная, тогда $U_{2эP}$ необходимо принимать со знаком «-».

2.6 Строим векторную диаграмму (рис.2.4).

Принимаем масштабы: $m_I=0.05$ А/мм; $m_U=2$ В/мм;

Последовательность построения векторов: \vec{U}_2 , $\vec{I}_2 = \vec{I}_{2P}$, $\vec{I}_4 = \vec{I}_{4a}$, \vec{I}_{5a} , \vec{I}_{5P} , $\vec{I}_6 = \vec{I}_{6P}$, \vec{I}_L , \vec{U}_{2ea} , \vec{U}_{2eP} , $\Delta\vec{U}_{La}$, $\Delta\vec{U}_{LP}$, $\Delta\vec{U}_L$, \vec{U}_1 .

Выполняем анализ векторной диаграммы. Из нее следует, что токи I_2 , I_5 – отстают по фазе от напряжения U_2 , ток I_4 совпадает с ним, ток I_5 опережает U_2 . Общий ток I_L отстает по фазе от напряжения U_2 на угол φ_Σ , а от напряжения U_1 на угол φ_H . Из векторной диаграммы $\vec{U}_1 = \Delta\vec{U}_L + \vec{U}_2$, т.е. падения напряжений в линии ΔU_L на переменном токе влияет на величину напряжения в конце линии U_2 геометрически. Фактически алгебраическая разность напряжений в начале и в конце линии переменного тока называется потерями напряжения ΔU_L .

Значение:

$$\Delta U_L = U_1 - U_2 = 259.6 - 220 = 39.6 \text{ В.}$$

На переменном токе потери напряжения отличаются от падения напряжения ($\Delta U \neq \Delta U_L$; $39.6 \neq 64.5 \text{ В}$). При индуктивном характере нагрузки эквивалентного приемника напряжение в конце линии меньше чем в начале нагрузки ($220 < 259,6\text{В}$).

УКАЗАНИЕ: Если сопротивление эквивалентного приемника носит емкостной характер, то ток I_L будет опережать напряжение U_2 , а может и U_1 . При этом напряжение в конце линии может быть выше чем напряжение в начале линии.

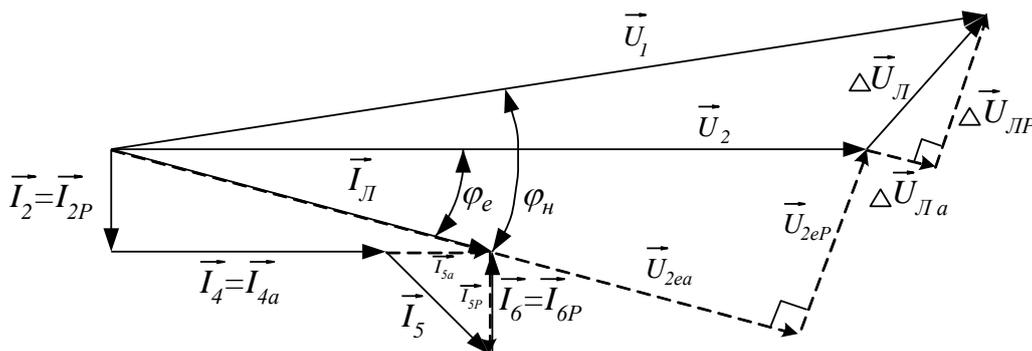


Рисунок 2.4 – Векторная диаграмма для схемы цепи рис.2.2, для расчета цепи по методу разложения на активно-реактивные токи

2.7 В четвертой ветви схемы имеет место резонанс напряжений ($X_{L4}=X_{C4}$). Определяем напряжения на элементах данной ветви:

$$U_{R4} = I_4 R_4 = 2.2 \cdot 100 = 220 \text{ В}$$

$$U_{L4} = I_4 X_{L4} = 2.2 \cdot 400 = 880 \text{ В}$$

$$U_{C4} = I_4 X_{C4} = 2.2 \cdot 400 = 880 \text{ В}$$

Убедимся, что в нашем случае напряжение на элементах, работающих в режиме резонанса, больше напряжения напруга U_2 .

2.8 Между пятой и шестой ветвями схемы имеет место резонанс токов ($I_{5P}=I_{6P}$), причем эти токи находятся в противофазе по отношению друг к другу, поскольку I_{5P} – индуктивный ток, а I_{6P} – емкостный ток. Общий ток, потребляемый из сети совместно пятым и шестым приемниками $\vec{I}_{5-6} = \vec{I}_5 + \vec{I}_6$ (покажем его на схеме рис.2.2), является исключительно активным током ($\vec{I}_{5-6} = \vec{I}_{5a}$). Таким образом, при резонансе токов индуктивность и емкость обмениваются реактивными токами между собой, не вовлекая в этот обмен линию и генератор.

2.9 Определяем активные, реактивные и полные мощности каждого приемника и в сопротивлениях ЛЭП.

Активные мощности:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = 220 \cdot 0.8 \cdot 0 = 0 \text{ Вт};$$

$$P_4 = U_2 I_4 \cos \varphi_4 = 220 \cdot 2.2 \cdot 1 = 484 \text{ Вт};$$

$$P_5 = U_2 I_5 \cos \varphi_5 = 220 \cdot 1.56 \cdot 0.707 = 243 \text{ Вт};$$

$$P_6 = U_2 I_6 \cos \varphi_6 = 220 \cdot 1.1 \cdot 0 = 0 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{\text{л}} = R_{\text{л}} I_{\text{л}}^2 = 6 \cdot 3.4^2 = 69 \text{ Вт}.$$

Реактивные мощности:

$$Q_2 = U_2 I_2 \sin \varphi_2 = 220 \cdot 0.8 \cdot 1 = 176 \text{ ВА};$$

$$Q_4 = U_2 I_4 \sin \varphi_4 = 220 \cdot 2.2 \cdot 0 = 0 \text{ ВА};$$

$$Q_5 = U_2 I_5 \sin \varphi_5 = 220 \cdot 1.56 \cdot 0.707 = 243 \text{ ВА};$$

$$Q_6 = U_2 I_6 \sin \varphi_6 = 220 \cdot 1.1 \cdot 1 = 242 \text{ ВА};$$

$$\Delta Q_{\text{л}} = X_{\text{л}} I_{\text{л}}^2 = 18 \cdot 3.4^2 = 208 \text{ ВА}.$$

Полные мощности:

$$S_2 = U_2 I_2 = 220 \cdot 0.8 = 176 \text{ ВА};$$

$$S_4 = U_2 I_4 = 220 \cdot 2.2 = 484 \text{ ВА};$$

$$S_5 = U_2 I_5 = 220 \cdot 1.56 = 343 \text{ ВА};$$

$$S_6 = U_2 I_6 = 220 \cdot 1.1 = 242 \text{ ВА};$$

$$\Delta S_{\text{л}} = \Delta U_{\text{л}} I_{\text{л}} = 64.5 \cdot 3.4 = 219 \text{ ВА}.$$

2.10 Определяем активную, реактивную и полную мощности, потребляемые цепью от генератора.

$$\cos \varphi_{\text{н}} = \frac{\sum U_{\text{а}}}{U_1} = \frac{213.4 + 20.4}{259.6} = 0.9; \quad \sin \varphi_{\text{н}} = \frac{\sum U_{\text{р}}}{U_1} = \frac{51.7 + 61.2}{259.6} = 0.435.$$

Мощности, потребляемые от генератора:

$$P_{\text{с}} = U_1 I_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{н}} = 259.6 \cdot 3.4 \cdot 0.9 = 795 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{с}} = U_1 I_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{н}} = 259.6 \cdot 3.4 \cdot 0.435 = 384 \text{ ВАр};$$

$$S_{\text{с}} = U_1 I_{\text{л}} = 259.6 \cdot 3.4 = 883 \text{ ВА}.$$

2.11 Составим баланс активных и реактивных мощностей.

Активные мощности:

Суммарная активная мощность $P_{\text{с}}$, потребляемая из сети, равна арифметической сумме активных мощностей всех приемников $\sum P_i$:

$$P_{\text{с}} = \sum P_i = P_2 + P_4 + P_5 + P_6 + \Delta P_{\text{л}}$$

Получаем: $795 = (483 + 243 + 69) \text{ Вт}; 795 \text{ Вт} \approx 796 \text{ Вт}.$

Относительная погрешность расчетов:

$$\Delta p = \frac{P_{\text{с}} - \sum P_i}{P_{\text{с}}} = \frac{795 - 796}{795} \cdot 100\% = 0.12\%.$$

Реактивные мощности:

Суммарная реактивная мощность $Q_{\text{с}}$, потребляемая из сети, равна алгебраической сумме реактивных мощностей всех потребителей $\sum Q_i$:

$$Q_{\text{с}} = \sum Q_i = Q_2 + Q_4 + Q_5 - Q_6 + \Delta Q_{\text{л}}$$

При этом, реактивные мощности на индуктивных элементах принимаются со знаком «+», а на емкостных – со знаком «-».

Получаем: $384 = (243 + 176 - 242 + 208) \text{ ВАр}; 384 \text{ Вт} \approx 385 \text{ ВАр}.$

Относительная погрешность расчетов:

$$\Delta q = \frac{Q_c - \sum Q_i}{Q_c} = \frac{384 - 385}{384} \cdot 100\% = 0.26\%.$$

Б. Расчет однофазных цепей переменного тока комплексным методом

Расчёт цепи синусоидального тока символическим методом

Дано: $u_{BX}(t) = 127\sqrt{2} \cdot \sin(314t)$ В; $R_1 = X_1 = 4$ Ом, $R_2 = 6$ Ом, $X_2 = 8$ Ом, $X_3 = 16$ Ом.
 Схема электрической цепи (рис.2.5)

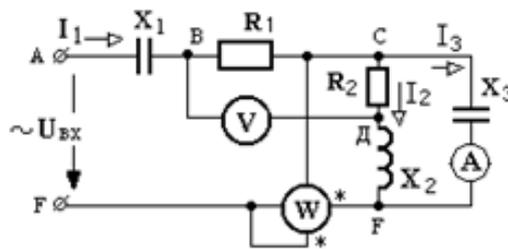


Рисунок 2.5 – Схема электрической цепи

Необходимо: отыскать токи, составить баланс мощностей, построить векторную диаграмму цепи, определить показания приборов, записать $i_3(t)$.

Решение

1. Принимаем положительные направления токов и записываем исходные данные в комплексной форме:

$$\underline{U}_{BX} = 127e^{j0^0}, \text{ В}$$

$$\underline{Z}_1 = R_1 - jX_1 = 4 - j4 = 4\sqrt{2}e^{-j45^0}, \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2 = 6 + j8 = 10e^{+j53,13^0}, \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_3 = -jX_3 = -j16 = 16e^{-j90^0}, \text{ Ом.}$$

2. Цепь простая, поэтому расчёт ведём по закону Ома.

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{BX} &= \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 4 - j4 + \frac{10e^{+j53,13} \cdot 16e^{-j90}}{6 + j8 - j16} = \\ &= 4 - j4 + 16e^{+j16,26^0} = 4 - j4 + [15,36 + j4,48] = 19,36e^{+j1,4^0} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

*Входной ток I_1 :

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{ex}}{\underline{Z}_{ex}} = \frac{127e^{j0^0}}{19,366e^{+j1,4^0}} = 6,56e^{-j1,4^0} = 6,558 - j0,16, \text{ А.}$$

*Токи I_2, I_3 при расчёте в комплексной форме можно находить *по формуле разброса тока* в параллельные ветви:

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 6,56e^{-j1,4^0} \cdot \frac{16e^{-j90^0}}{10e^{-j53,13^0}} = 10,5e^{-j38,27^0} = 8,24 - j6,5 \text{ А}$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 6,56e^{+j104,86^0} = -1,682 + j6,34, \text{ А.}$$

3. Проверка баланса мощностей цепи.

$$\underline{S}_{ucm} = P_{ucm} \pm jQ_{ucm} = \underline{U}_{ex} \underline{I}_1^* = 127e^{j0^0} \cdot 6,56e^{+j1,4^0} = 832,9 + j20,36 \text{ ВА}$$

Активную и реактивную мощности потребителей лучше считать отдельно и по простейшим формулам:

$$\Sigma P_{номр} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = 4 \cdot 6,56^2 + 6 \cdot 10,5^2 = \mathbf{832,9} \text{ Вт.}$$

$$\Sigma Q_{np} = -X_1 I_1^2 + X_2 I_2^2 - X_3 I_3^2 = -4 \cdot 6,56^2 + 8 \cdot 10,5^2 - 16 \cdot 6,56^2 = \mathbf{+20,82} \text{ Вар.}$$

4. По комплексу тока I_3 записываем его мгновенное значение:

$$i_3(t) = 6,56\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 104,86^0), \text{ А.}$$

5. Для построения совмещённой векторной диаграммы цепи считаем:

$$\underline{U}_{R1} = R_1 \underline{I}_1 = 4 \cdot (6,558 - j0,16) = 26,23 - j0,64 \text{ В}$$

$$\underline{U}_{X1} = (-jX_1 \cdot \underline{I}_1) = (-j4)(6,558 - j0,16) = -0,64 - j26,23 \text{ В}$$

$$\underline{U}_{R2} = R_2 \cdot \underline{I}_2 = 6 \cdot (8,24 - j6,5) = 49,44 - j39 \text{ В}$$

$$\underline{U}_{X2} = (+jX_2 \underline{I}_2) = (+j8)(8,24 - j6,5) = 52 + j65,92 \text{ В}$$

$$\underline{U}_{X3} = (-jX_3) \cdot \underline{I}_3 = (-j16)(-1,682 + j6,34) = 101,44 + j27 \text{ В.}$$

Векторную диаграмму цепи (рис.2.6) строим в масштабах: $m_i = 0,1 \text{ А/мм}$; $m_u = 1 \text{ В/мм}$.

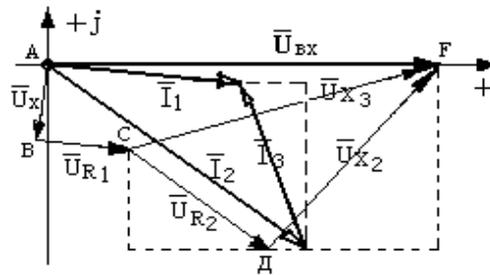


Рисунок 2.6 – Векторная диаграмма цепи

6. Расчёт показаний приборов.

Амперметр измеряет действующее значение тока, т.е. покажет модуль комплекса тока: $I_A = |\underline{I}_3| = 6.56 \text{ A}$.

Вольтметр также показывает модуль комплекса напряжения \underline{U}_V , который находим по Пз Кирхгофа:

$$+\underline{U}_V - R_2 \underline{I}_2 - R_1 \underline{I}_1 = 0 \quad \underline{U}_V = 85,424 e^{-j27,648^\circ} \text{ В. И так: } U_V = \mathbf{85,42 \text{ В.}}$$

Ваттметр /звёздочками обозначены начала обмоток/ измеряет активную мощность, которая в комплексной форме рассчитывается как вещественная часть произведения комплексов $\underline{U}_W \cdot \underline{I}_W^*$.

$$\underline{I}_W^* = + \underline{I}_1^* = 6.56 e^{+j1.4^\circ}, \text{ А.}$$

$$\underline{U}_W = \underline{U}_{FC} = - \underline{U}_{CF} = - \underline{U}_{X3} = -(101,44 + j27) = 104,972 e^{-j165,1^\circ}, \text{ В}$$

$$P_W = \text{Re}[\underline{U}_W \cdot \underline{I}_1^*] = \text{Re}[104,972 e^{-j165,1^\circ} \cdot 6,56 e^{+j1,4^\circ}] = -661.92 \text{ Вт.}$$

В данном примере ваттметр, по сути, измеряет активную мощность параллельного участка, только со знаком минус. Поэтому P_W можно проверить:

$$P_W = R_2 \cdot I_2^2 = 6 \cdot 10.5^2 = 661,5 \text{ Вт.}$$

3. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Исходные данные

К трехфазной линии переменного тока с линейным напряжением $U_{\text{л}}$ подключены приемники в соответствии со схемой (рис.3.1). Варианты значений $U_{\text{л}}$ и параметры приемников выбираются из табл. 3.1 (Емкостные сопротивления представлены со знаком минус «-»).

Расчет трехфазных цепей выполняется для каждой фазы отдельно при несимметричной нагрузке по тем же законам и соотношениям, что и для однофазных цепей переменного тока.

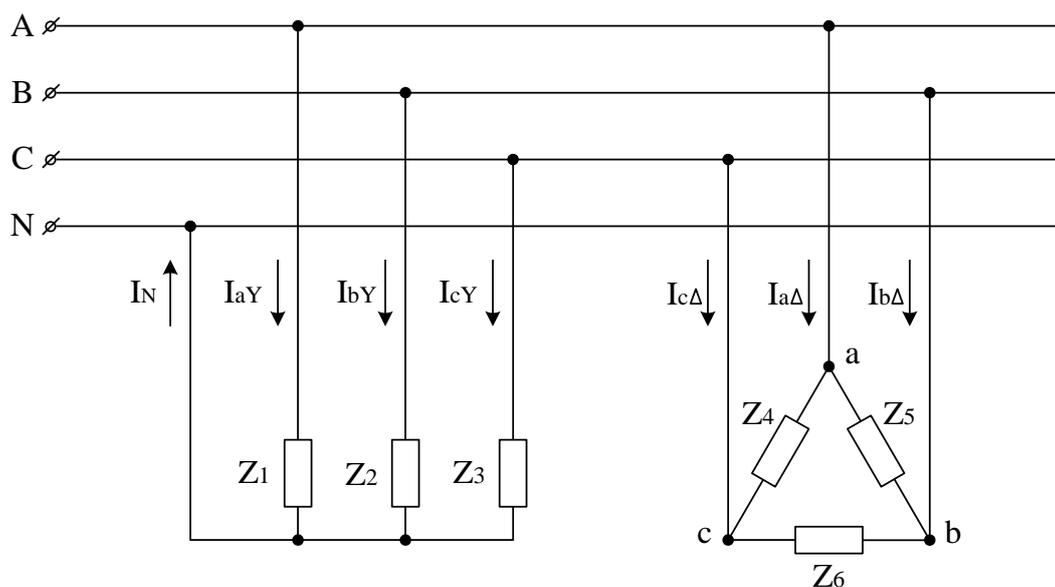


Рисунок 3.1 - Принципиальная схема подключения приемников к трехфазной цепи

Начертить схему замещения цепи с учетом параметров приемников для заданного варианта. Сопротивления ЛЭП пренебречь ($Z_{\text{ЛЭП}}=0$).

1. Определить фазные токи приемников, включенных по схеме соединения «треугольник».
2. Построить векторную диаграмму для п.2 и определить линейные токи приемников в схеме соединения «треугольник».
3. Определить токи приемников, включенных по схеме соединения «звезда» с нейтральным проводом, и ток в нейтральном проводе.
4. Построить векторную диаграмму цепи для п.4.
5. Определить суммарные токи, потребляемые приемниками от ЛЭП, графическим методом (используя совмещенную векторную диаграмму).
6. Определить активные мощности фаз приемников для схем соединения «звезда» и «треугольник», суммарную активную мощность всей цепи.
7. Определить реактивные мощности фаз приемников, включенных по схеме «звезда» и «треугольник».
8. Начертить схему замещения приемников, включенных по схеме «треугольник», при обрыве линейного провода, соединяющего точку «b»

приемника с линией В (рис.3.1) и определить для этого случая токи в фазах этих приемников и в линейных проводах. Начертить векторную диаграмму цепи для данного случая.

Таблица 3.1 - Параметры приемников электроэнергии

Вариант	Соединение												U _л , В
	треугольник						звезда						
	R _{ab} , Ом	X _{ab} , Ом	R _{bc} , Ом	X _{bc} , Ом	R _{ca} , Ом	X _{ca} , Ом	R _a , Ом	X _a , Ом	R _b , Ом	X _b , Ом	R _c , Ом	X _c , Ом	
mn	10	0	32	-24	12	16	48	0	3	-4	8	6	380
00	6	8	10	0	10	0	5	0	5	0	5	0	220
01	5	0	5	0	5	0	6	8	10	0	10	0	380
02	6	8	10	0	8	6	0	-5	5	0	5	0	660
03	0	-5	5	0	5	0	7	8	6	8	6	8	220
04	3	4	5	0	0	5	0	10	0	10	0	10	220
05	10	0	10	0	0	10	4	3	4	-3	0	-5	660
06	3	4	5	0	0	5	0	10	0	10	0	10	220
07	0	-10	10	0	0	10	3	4	3	4	3	4	380
08	20	0	20	0	12	16	0	20	0	20	0	20	660
09	0	-20	20	0	16	12	20	0	20	0	20	0	1140
10	6	8	10	0	8	-6	4	0	4	0	4	0	220
11	40	0	40	0	24	-32	6	8	6	8	6	8	220
12	0	-5	5	0	3	24	8	6	8	6	8	6	380
13	8	6	8	-6	8	6	0	-5	0	-5	0	-5	660
14	5	0	5	0	0	-5	0	10	0	10	0	10	220
15	0	-10	10	0	0	-10	5	0	5	0	5	0	380
16	12	16	20	0	0	-20	10	0	10	0	10	0	1140
17	10	0	0	10	10	0	12	16	12	16	12	16	660
18	16	12	16	-12	16	-12	20	0	20	0	20	0	1140
19	20	0	0	20	0	20	16	12	16	12	16	12	660
20	24	32	0	40	40	0	40	0	40	0	40	0	1140
21	40	0	0	40	24	32	24	32	0	40	40	0	660
22	4	3	0	5	5	0	5	0	5	0	5	0	220
23	5	0	0	5	4	-3	4	3	4	3	4	-3	360
24	8	6	0	10	0	-10	10	0	10	0	10	0	660
25	10	10	0	10	10	-10	-8	6	0	10	0	10	220
26	16	12	0	20	16	-12	20	0	20	0	20	0	660
27	20	0	16	12	20	0	16	12	16	12	16	12	1140
28	24	32	0	40	0	-40	12	16	12	16	12	16	660
29	5	0	3	4	0	5	6	-8	6	-8	6	-8	220
30	12	16	12	16	20	0	10	0	10	0	10	0	380
31	10	0	6	8	6	8	12	16	12	16	12	16	1140
32	24	-32	24	-32	0	40	12	16	12	16	12	16	1140
33	3	7	0	-5	5	0	5	0	5	0	5	0	220
34	20	0	12	16	12	-16	10	0	10	0	0	-10	380
35	6	8	0	-10	0	10	10	0	10	0	0	10	220
36	40	0	24	32	0	-40	20	0	0	-20	0	-20	1140
37	12	10	0	-20	12	16	10	0	0	10	0	10	660
38	5	0	0	-5	3	-4	4	-3	4	-3	4	3	220
39	24	36	0	-40	24	-36	20	0	0	-20	0	-20	1140
40	10	0	6	-8	0	10	6	-8	6	8	6	8	660

Вариант	Соединение												U _л , В
	треугольник						звезда						
	R _{ab} , Ом	X _{ab} , Ом	R _{bc} , Ом	X _{bc} , Ом	R _{ca} , Ом	X _{ca} , Ом	R _a , Ом	X _a , Ом	R _b , Ом	X _b , Ом	R _c , Ом	X _c , Ом	
41	4	3	0	-5	0	-5	4	-3	4	3	4	3	220
42	20	0	16	-12	16	12	6	8	6	-8	6	-8	380
43	10	0	0	-10	3	-10	10	0	10	0	0	10	660
44	8	6	8	6	10	0	8	-6	8	6	8	6	220
45	40	0	32	-24	32	-24	24	32	24	-32	24	32	1140
46	16	12	16	12	0	20	10	0	0	-10	0	10	380
47	5	0	3	-4	0	5	4	3	4	-3	4	3	660
48	32	24	32	24	32	24	24	20	0	-20	0	20	1140
49	10	10	20	-20	30	0	24	0	0	-20	0	30	660
50	5	0	4	-3	3	4	3	4	3	4	3	4	220
51	5	0	5	0	5	0	6	8	10	0	10	0	220
52	6	8	10	0	10	0	5	0	5	0	5	0	380
53	0	-5	5	0	5	0	6	8	10	0	8	6	660
54	7	8	7	8	6	8	0	-5	5	0	5	0	220
55	10	0	10	0	10	0	4	3	4	-3	0	-5	380
56	4	3	4	-3	0	-5	10	0	10	0	0	10	660
57	0	10	0	10	0	10	3	4	5	0	0	5	220
58	3	4	3	4	3	4	0	-10	10	0	0	10	380
59	0	20	0	20	0	20	20	0	20	0	12	16	660
60	20	0	20	0	20	0	0	20	20	0	16	12	1140
61	4	0	4	0	4	0	6	8	10	0	8	-6	220
62	6	8	6	8	6	8	40	0	40	0	24	-36	1140
63	8	6	8	6	8	6	0	-5	5	0	3	-4	220
64	0	-5	0	-5	0	-5	8	6	8	-6	8	6	380
65	0	10	0	10	0	10	5	0	5	0	0	-5	660
66	5	0	5	0	5	0	0	-10	10	0	0	-10	220
67	10	0	10	0	10	0	12	16	20	0	0	-20	380
68	12	16	12	16	12	16	10	0	10	10	10	0	660
69	20	0	20	0	20	0	16	12	16	-12	16	-12	1140
70	16	12	16	-12	16	-12	20	0	0	20	0	20	660
71	40	0	40	0	40	0	24	4	36	0	40	0	1140
72	24	36	0	40	40	0	40	0	0	40	24	35	1140
73	5	0	5	0	5	0	4	3	0	5	5	0	220
74	4	-3	4	3	4	-3	5	0	0	5	4	-3	380
75	10	0	10	0	10	0	8	6	0	10	0	-10	660
76	8	6	20	10	20	10	10	0	0	10	0	-10	220
77	20	0	20	0	20	0	16	12	0	20	16	-12	380
78	16	12	16	12	16	12	20	0	16	12	20	0	660
79	12	16	12	16	12	16	24	32	0	40	0	-40	1140
80	6	-8	6	-8	6	-8	5	0	3	4	0	5	220
81	10	0	10	0	10	0	12	16	20	16	20	0	380
82	12	16	12	16	12	16	10	0	6	8	6	8	660
83	12	16	12	16	12	16	24	-36	24	-36	0	40	1140
84	5	0	5	0	5	0	3	4	0	-5	5	0	220
85	10	0	10	0	0	-10	20	0	12	16	12	-16	380
86	10	0	10	0	0	10	6	88	0	-10	0	10	660
87	20	0	0	-20	0	-20	40	0	24	36	0	40	1140
88	10	0	0	10	0	10	12	16	0	-20	12	16	1140

Вариант	Соединение												U _л , В
	треугольник						звезда						
	R _{ab} , Ом	X _{ab} , Ом	R _{bc} , Ом	X _{bc} , Ом	R _{ca} , Ом	X _{ca} , Ом	R _a , Ом	X _a , Ом	R _b , Ом	X _b , Ом	R _c , Ом	X _c , Ом	
89	4	-3	4	-3	4	3	5	0	0	-5	3	-4	220
90	20	0	0	-20	0	-20	24	36	0	-40	24	-36	380
91	6	-8	6	8	6	8	10	0	6	-8	0	10	660
92	4	-3	4	3	4	3	4	3	0	-5	0	-5	280
93	6	8	6	-8	6	-8	20	0	16	-12	16	12	380
94	10	0	10	0	0	10	10	0	0	-10	0	-10	660
95	8	-6	8	6	8	6	8	6	8	6	10	0	220
96	24	36	24	-36	24	36	40	0	36	-24	36	-24	1140
97	10	0	0	-10	0	10	16	12	16	12	0	20	220
98	4	3	4	-3	4	-3	5	0	3	-4	0	5	380
99	16	12	12	16	20	0	3	4	5	0	3	-4	660
100	10	0	10	0	10	0	24	32	12	16	0	-40	1140

«Расчет трехфазных цепей переменного тока»

Решение

Пусть две последние цифры номера зачетной книжки «*mn*». В этом случае в соответствии с табл.3.1 заданы сопротивления фаз приемников:

а) соединение «треугольник»:

$$R_{ab} = 10 \text{ Ом}; X_{ab} = 0 \text{ Ом};$$

$$R_{ab} = 32 \text{ Ом}; X_{ab} = -24 \text{ Ом};$$

$$R_{ab} = 12 \text{ Ом}; X_{ab} = 16 \text{ Ом}.$$

б) соединение «звезда»:

$$R_a = 48 \text{ Ом}; X_a = 0 \text{ Ом};$$

$$R_b = 3 \text{ Ом}; X_b = -4 \text{ Ом};$$

$$R_c = 12 \text{ Ом}; X_c = 16 \text{ Ом}.$$

Линейное напряжение сети $U_{л} = 380 \text{ В}$.

3.1 В соответствии с заданием, схема замещения приведена на рис. 3.2. На ней стрелками указаны условно-положительные направления заданных линейного ($\bar{U}_{AB}, \bar{U}_{BC}, \bar{U}_{CA}$) и фазного ($\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$) напряжения сети (источника), фазных напряжений для схемы соединения «звезда» ($\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$) и «треугольника» ($\bar{U}_{ab}, \bar{U}_{bc}, \bar{U}_{ca}$); фазных и линейных ($\bar{I}_{ab}, \bar{I}_{bc}, \bar{I}_{ca}, \bar{I}_{a\Delta}, \bar{I}_{b\Delta}, \bar{I}_{c\Delta}$) токов нагрузки для треугольника; фазных (они же линейные) токов нагрузки

для схемы соединения «звезда» ($\overline{I_{aY}}, \overline{I_{bY}}, \overline{I_{cY}}$); общих линейных токов, потребляемых от источника ($\overline{I_A}, \overline{I_B}, \overline{I_C}$); тока нейтрали I_N .

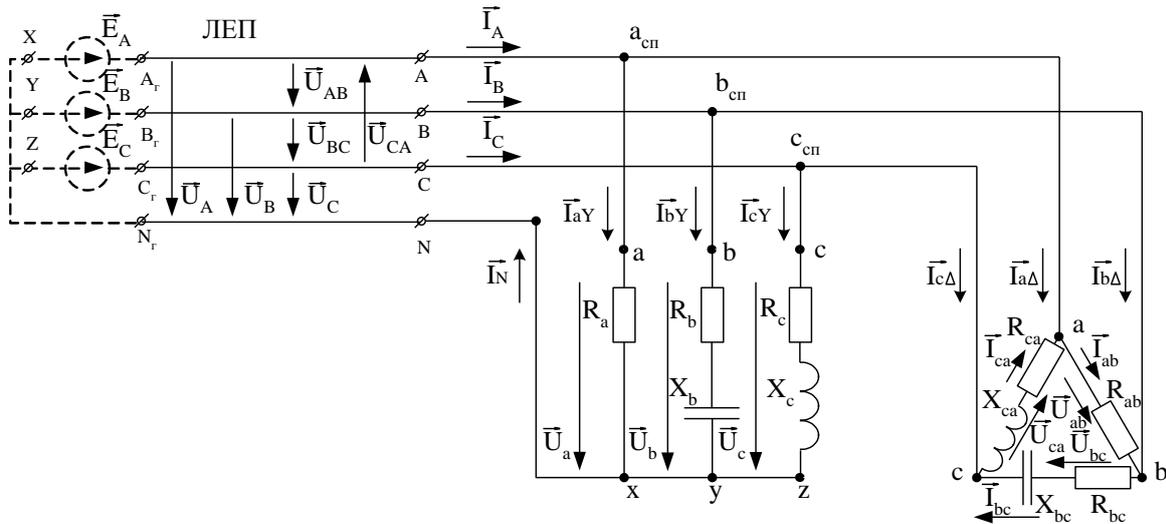


Рисунок 3.2 – Схема замещения трехфазной сети

На схеме указаны (пунктиром) идеальный источник (зажимы A_r, B_r, C_r, N_r) и ЛЭП (между зажимами $A_r - A, B_r - B, C_r - C, N_r - N$).

3.2. Определяем фазные токи приемников, для схемы соединения «треугольник» $U_\phi = U_\Delta$.

УКАЗАНИЕ: Ток в какой-либо фазе: $I_\phi = U_\phi / Z_\phi$. Для угла сдвига фаз между напряжением и током:

$$\cos \varphi_\phi = \frac{R_\phi}{Z_\phi}; \quad \sin \varphi_\phi = \frac{X_{L\phi} - X_{C\phi}}{Z_\phi}; \quad \varphi_\phi = \arctg \frac{X_{L\phi} - X_{C\phi}}{R_\phi}.$$

Нагрузка фаз несимметричная, поэтому токи и углы определяются для каждой фазы отдельно. Величины токов:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{U_{ab}}{R_{ab}} = \frac{380}{10} = 38 \text{ A};$$

$$I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{U_{bc}}{\sqrt{R_{bc}^2 + X_{bc}^2}} = \frac{380}{\sqrt{32^2 + 24^2}} = \frac{380}{40} = 9,5 \text{ A};$$

$$I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{U_{ca}}{\sqrt{R_{ca}^2 + X_{ca}^2}} = \frac{380}{\sqrt{12^2 + 16^2}} = \frac{380}{20} = 19 \text{ A}.$$

Определяем углы сдвига фаз между напряжениями и токами:

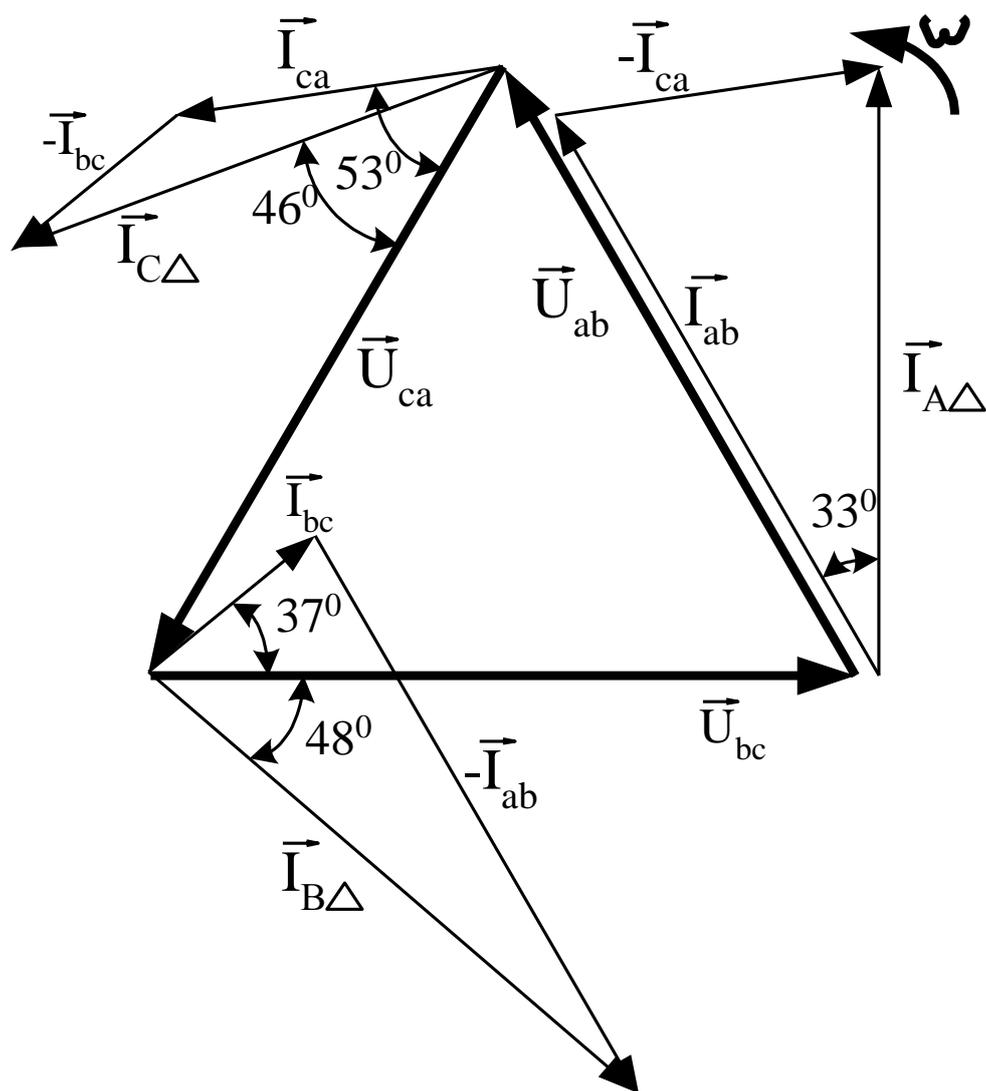


Рисунок 3.3 – Векторная диаграмма цепи для схемы соединения «треугольник»

$$\cos \varphi_{ab} = \frac{R_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{10}{40} = 0,25; \quad \sin \varphi_{ab} = \frac{X_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{30}{40} = 0,75; \quad \varphi_{ab} = 68,7^\circ;$$

$$\cos \varphi_{bc} = \frac{R_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{32}{40} = 0,8; \quad \sin \varphi_{bc} = \frac{-X_{bc}}{Z_{bc}} = -\frac{24}{40} = -0,6; \quad \varphi_{bc} = -37^\circ;$$

$$\cos \varphi_{ca} = \frac{R_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{12}{20} = 0,6; \quad \sin \varphi_{ca} = \frac{X_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{16}{20} = 0,8; \quad \varphi_{ca} = 53^\circ;$$

3.3 Строим векторную диаграмму (рис.3.3) для приемников, соединенных по схеме «треугольник». Порядок построения:

3.3.1 Выбираем масштабы для напряжений и токов ($m_u = 50 \text{ В/см}; m_i = 5 \text{ А/см}$).

Строим в масштабе треугольник векторов линейного напряжения $\bar{U}_{AB}, \bar{U}_{BC}, \bar{U}_{CA}$, которые в схеме соединения «треугольник», совпадают с фазным напряжением $\bar{U}_{ab}, \bar{U}_{bc}, \bar{U}_{ca}$

3.3.2. С учетом углов сдвига фаз φ_Φ строим векторы фазных токов $\bar{I}_{ab}, \bar{I}_{bc}, \bar{I}_{ca}$. Для приемника фазы а-в при активной нагрузке угол сдвига фаз $\varphi_{ab} = 0$. Вектор \bar{I}_{ab} направлен параллельно вектору \bar{U}_{ab} в ту же сторону. Для приемника фазы в- при активно-емкостной нагрузке угол сдвига фаз $\varphi_{bc} = -37^\circ$, т.е. ток \bar{I}_{bc} опережает напряжение \bar{U}_{bc} . Вектор \bar{I}_{bc} поворачиваем на угол 37° против часовой стрелки относительно вектора \bar{U}_{bc} . Для приемника фазы с-а при активно-индуктивной нагрузке угол сдвига фаз $\varphi_{ca} = 53^\circ$, т.е. ток, \bar{I}_{ca} запаздывает от напряжения \bar{U}_{ca} . Вектор \bar{I}_{ca} поворачиваем на угол 53° по часовой стрелке относительно вектора \bar{U}_{ca} .

Определяем линейные токи в схеме соединения «треугольник».

УКАЗАНИЕ: Для узлов «а», «в», «с» в схеме соединения «треугольник» можно записать уравнения, связывающие линейные и фазные токи:

$$\bar{I}_{A\Delta} = \bar{I}_{ab} - \bar{I}_{ca}; \quad \bar{I}_{B\Delta} = \bar{I}_{bc} - \bar{I}_{ab}; \quad \bar{I}_{C\Delta} = \bar{I}_{ca} - \bar{I}_{bc};$$

В соответствии с приведенными выше выражениями к вектору \bar{I}_{ab} на диаграмме достраиваем вектор $-\bar{I}_{ca}$. Их сумма дает вектор $\bar{I}_{A\Delta}$. Аналогично находим $\bar{I}_{B\Delta}, \bar{I}_{C\Delta}$. Измерив длину отрезков построенных векторов и умножив на масштаб тока, находим:

$$I_{A\Delta} = 35 \text{ A}; \quad I_{B\Delta} = 38.5 \text{ A}; \quad I_{C\Delta} = 28 \text{ A};$$

Вследствие несимметрии приемников, соединенных по схеме «треугольник» все фазные и линейные токи отличаются.

УКАЗАНИЕ: В схеме соединения «треугольник» при симметричной нагрузке все линейные токи равны между собой и в $\sqrt{3}$ раз больше фазных, опережая последние на угол 30° ; расчет токов достаточно проводить для одной фазы:

$$I_\Phi = U_\Phi / Z_\Phi; \quad I_\Delta = \sqrt{3} I_\Phi; \quad \cos \varphi_\Phi = \frac{R_\Phi}{Z_\Phi}; \quad \sin \varphi_\Phi = \frac{X_\Phi}{Z_\Phi}.$$

3.4 Определяем токи приемников, соединенных по схеме «звезда». Нагрузка фаз несимметричная, но поскольку в схеме есть нейтральный провод, то напряжение каждой фазы в схеме соединения «звезда» принудительно поддерживается равной фазному напряжению источника. Тогда:

$$U_a = U_b = U_c = U_{\Delta} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220(\text{В}).$$

Поскольку нагрузка фаз несимметричная, токи и углы определяются для каждой фазы отдельно. В схеме соединения «звезда» значения фазных (линейных) токов $I_{\Phi Y} = I_{\Delta Y}$, потребляемых из сети, равны:

$$I_{aY} = \frac{U_a}{Z_a} = \frac{U_a}{R_a} = \frac{220}{48} = 4,5 \text{ А};$$

$$I_{bY} = \frac{U_b}{Z_b} = \frac{U_b}{\sqrt{R_b^2 + X_b^2}} = \frac{220}{\sqrt{3^2 + 4^2}} = \frac{220}{5} = 44 \text{ А};$$

$$I_{cY} = \frac{U_c}{Z_c} = \frac{U_c}{\sqrt{R_c^2 + X_c^2}} = \frac{220}{\sqrt{8^2 + 6^2}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А};$$

$$\cos \varphi_a = \frac{R_a}{Z_a} = \frac{48.4}{48.4} = 1; \quad \sin \varphi_a = \frac{X_a}{Z_a} = \frac{0}{48.4} = 0; \quad \varphi_a = 0^\circ;$$

$$\cos \varphi_b = \frac{R_b}{Z_b} = \frac{3}{5} = 0,6; \quad \sin \varphi_b = \frac{-X_b}{Z_b} = -\frac{4}{5} = -0,8; \quad \varphi_b = -53^\circ;$$

$$\cos \varphi_c = \frac{R_c}{Z_c} = \frac{8}{10} = 0,8; \quad \sin \varphi_c = \frac{X_c}{Z_c} = \frac{6}{10} = 0,6; \quad \varphi_c = 37^\circ;$$

УКАЗАНИЕ: В схеме соединения «звезда» при симметричной нагрузке все токи равны и углы сдвига фаз также равны между собой; расчет токов достаточно выполнять для одной фазы.

3.5 Строим векторную диаграмму (рис.3.4) для п.3.4 и определяем из нее ток в нейтральном проводе. Порядок построения векторной диаграммы:

3.5.1 Выбираем масштабы m_u, m_i (желательно сохранение как и для случая в схеме соединения «треугольник»); $m_u = 50 \text{ В/см}; m_i = 5 \text{ А/см}$.

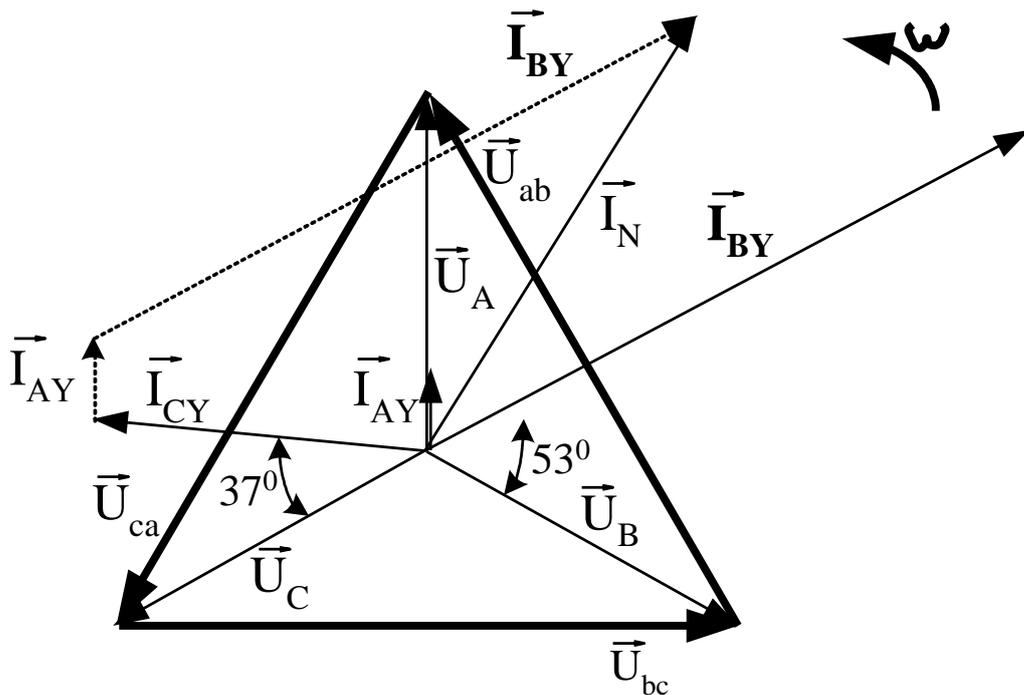


Рисунок 3.4 – Векторная диаграмма для схемы соединения «звезда»

3.5.2 Строим «треугольник» векторов линейного напряжения сети $\bar{U}_{AB}, \bar{U}_{BC}, \bar{U}_{CA}$ и в нем «звезду» векторов фазного напряжения сети $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$; последние одновременно являются векторами напряжений $\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$ на фазах приемников, соединенных по схеме «звезда» с нейтральным проводом.

3.5.3 Строим векторы фазных токов для схемы соединения «звезда» (они также являются линейными). Для фазы а-х при активной нагрузке угол сдвига фаз $\varphi_a = 0$, вектор тока \bar{I}_{aY} откладывается в ту же сторону, что и вектор напряжения \bar{U}_a . Для фазы в-у при активно-емкостной нагрузке угол сдвига фаз $\varphi_b = -53^\circ$. Вектор \bar{I}_{bY} откладывается под углом 53° против часовой стрелки от вектора \bar{U}_b . Для фазы с-з при активно-индуктивной нагрузке угол сдвига фаз $\varphi_c = 37^\circ$. Вектор \bar{I}_{cY} откладывается под углом 37° по часовой стрелке по отношению к вектору напряжения \bar{U}_c .

Из векторной диаграммы определяем ток нейтрали I_N . Для узла N по первому закону Кирхгофа:

$$\bar{I}_N = \bar{I}_{aY} + \bar{I}_{bY} + \bar{I}_{cY}.$$

В соответствии с приведенным выше выражением суммируем векторы (пунктирные линии на рис.3.4) и получаем вектор \bar{I}_N . Измерив его длину и умножив на масштаб тока, получаем:

$$I_N = 30 \text{ A}.$$

УКАЗАНИЕ: В схеме соединения «звезда» при симметричной нагрузке все токи и углы сдвига фаз одинаковые, тогда:

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

3.6 Определяем суммарные токи, потребляемые приемниками, которые соединены по схеме «треугольник» и «звезда». В схеме (рис. 3.2) по первому закону Кирхгофа можно записать:

$$\text{Узел } a_{cn}: \bar{I}_A = \bar{I}_{A\Delta} + \bar{I}_{AY};$$

$$\text{Узел } b_{cn}: \bar{I}_B = \bar{I}_{B\Delta} + \bar{I}_{BY};$$

$$\text{Узел } c_{cn}: \bar{I}_C = \bar{I}_{C\Delta} + \bar{I}_{CY};$$

Т.е. общий ток в каждом линейном проводе сети равен сумме токов в проводах, при помощи которых приемники подключаются к линейным проводам. Для определения линейных токов необходимо построить совмещенную векторную диаграмму.

3.6.1 Выбираем масштабы m_u, m_i (масштабы должны быть одинаковыми как в схеме соединения «треугольник», так и в схеме соединения «звезда»); $m_u = 50 \text{ В/см}; m_i = 8 \text{ А/см}$.

3.6.2 Строим треугольник линейных ($\bar{U}_{AB}, \bar{U}_{BC}, \bar{U}_{CA}$) и звезду фазных ($\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$) векторов напряжений трехфазной сети (рис.3.5).

3.6.3 Из центра треугольников откладываем в масштабе векторы $\bar{I}_{A\Delta}, \bar{I}_{B\Delta}, \bar{I}_{C\Delta}$ путем параллельного переноса с диаграммы (рис. 3.3), т.е. сохранением углов для векторов $\bar{U}_{AB}, \bar{U}_{BC}, \bar{U}_{CA}$ и аналогично векторы

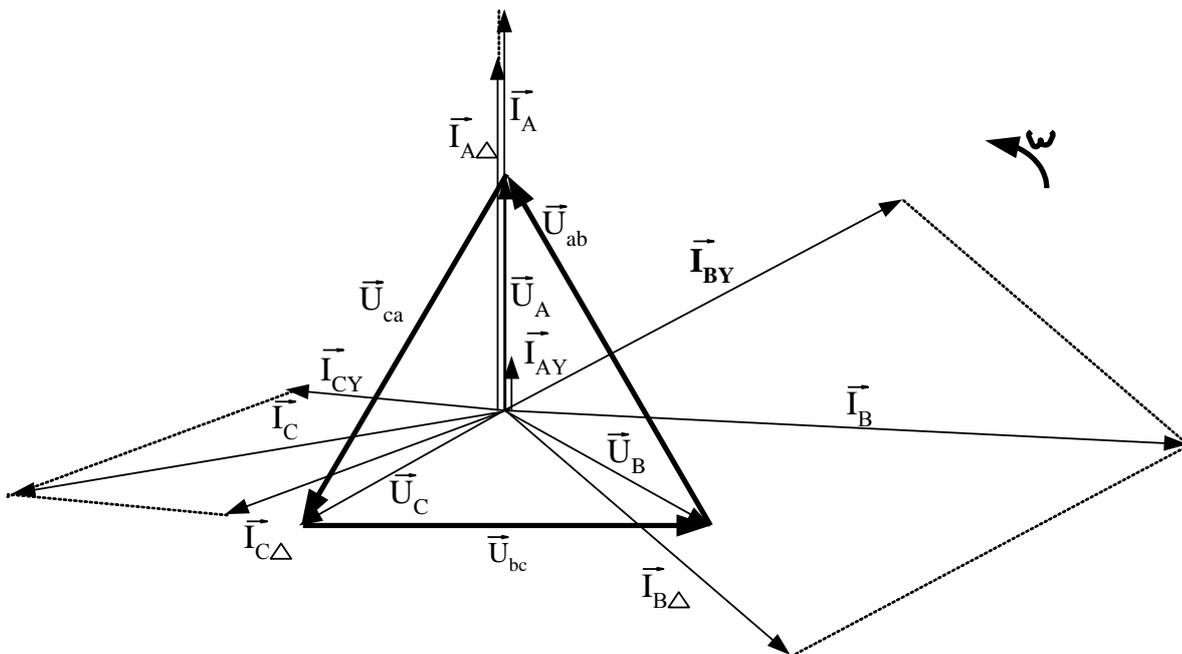


Рисунок 3.5 – Совмещенная векторная диаграмма

$\bar{I}_{aY}, \bar{I}_{bY}, \bar{I}_{cY}$ из диаграммы (рис.3.4) с сохранением углов для $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$. Геометрическим сложением векторов \bar{I}_{AY} и \bar{I}_{AD} находим вектор тока \bar{I}_A .

Аналогично определяем векторы \bar{I}_B и \bar{I}_C . Измерив длины векторов $\bar{I}_A, \bar{I}_B, \bar{I}_C$ и умножив на m_i получаем:

$$I_A = 39A; \quad I_B = 64A; \quad I_C = 45A.$$

Несимметрия приемников вызывает неодинаковую нагрузку разных фаз линии и источника, что плохо для электрической сети.

3.6.4 Проверка расчета. В соответствии с первым законом Кирхгофа должно выполняться условие (см. рис.3.2) $\bar{I}_N = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0$ для случая построения в масштабе $m_i = 5 A/cm$. С целью проверки правильности расчета строим многоугольник векторов в соответствии с приведенным выше выражением в масштабе $m_u = 50 B/cm; m_i = 8 A/cm$ (рис.3.6).

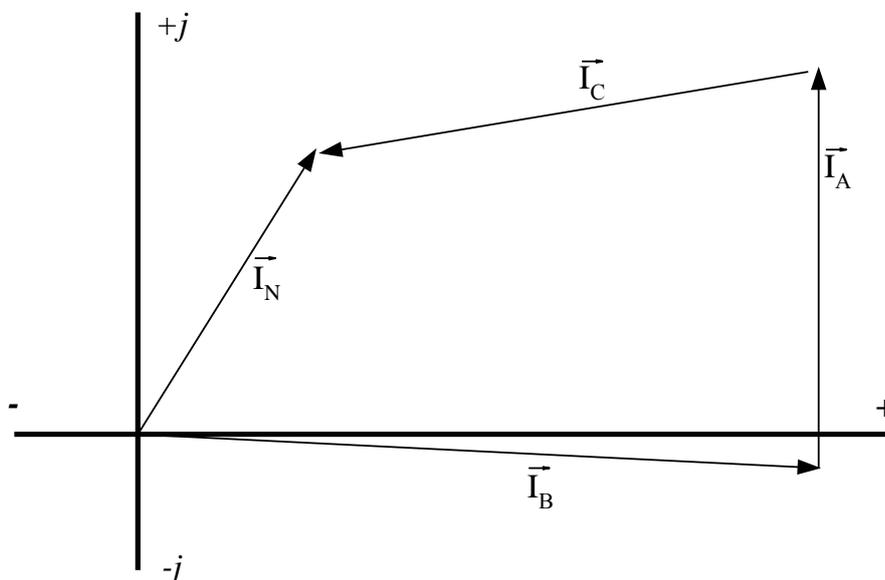


Рисунок 3.6 – Многоугольник векторов $\bar{I}_A, \bar{I}_B, \bar{I}_C$ и \bar{I}_N

3.7 Определяем активные мощности приемников, соединенных по схеме «звезда» и «треугольник». Общее выражение для активной мощности фазы независимо от схемы соединения:

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi.$$

При несимметричной нагрузке мощности должны рассчитываться отдельно для каждой фазы.

Для схемы соединения «треугольник»:

$$P_{ab} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab} = 380 \cdot 38 \cdot 1 = 14440 \text{ Вт} = 14,44 \text{ кВт};$$

$$P_{bc} = U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc} = 380 \cdot 9,5 \cdot 0,8 = 2888 \text{ Вт} = 2,898 \text{ кВт};$$

$$P_{ca} = U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca} = 380 \cdot 19 \cdot 0,6 = 4332 \text{ Вт} = 4,433 \text{ кВт}.$$

Для схемы соединения «звезда»:

$$\begin{aligned}P_a &= U_a I_a \cos \varphi_a = 220 \cdot 4.5 \cdot 1 = 990 \text{ Вт} = 0,99 \text{ кВт}; \\P_b &= U_b I_b \cos \varphi_b = 220 \cdot 44 \cdot 0.6 = 5808 \text{ Вт} = 5,81 \text{ кВт}; \\P_c &= U_c I_c \cos \varphi_c = 220 \cdot 22 \cdot 0.8 = 3872 \text{ Вт} = 3,87 \text{ кВт}.\end{aligned}$$

Суммарная активная мощность какой-либо цепи P_{Σ} равна арифметической сумме мощностей всех отдельных приемников $\sum P$, т.е. $P_{\Sigma} = \sum P$.

Тогда, для схемы соединения «треугольник»:

$$P_{\Delta} = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = 14.44 + 2.89 + 4.33 = 21.66 \text{ кВт}.$$

Для схемы соединения «звезда»:

$$P_Y = P_a + P_b + P_c = 0.99 + 5.81 + 3.87 = 10.67 \text{ кВт}.$$

Для всей цепи:

$$P_{\Sigma} = P_{\Delta} + P_Y = 21.66 + 10.67 = 32.33 \text{ кВт}.$$

УКАЗАНИЕ: При симметричной нагрузке в схеме соединения «звезда» или «треугольник» мощности во всех фазах одинаковы и суммарная активная мощность трех фаз приемника определяется по формуле $P = \sqrt{3} U_{\Delta} I_{\Delta} \cos \varphi_{\Phi}$ независимо от схемы соединения.

3.8. Вычисляем реактивные мощности отдельных фаз потребителей, включенных по схеме «звезда» и «треугольник». Формула реактивной мощности в фазе для обеих схем включения - общая, причем при индуктивном сопротивлении фазы это будет индуктивная мощность (условно приписываем знак «+»), для емкости – емкостная мощность (условно приписываем знак «-»).

При несимметричной нагрузке реактивная мощность определяется для каждой фазы отдельно.

Для схемы соединения «треугольник»:

$$\begin{aligned}Q_{ab} &= U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab} = 380 \cdot 38 \cdot 0 = 0; \\Q_{bc} &= U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_{bc} = 380 \cdot 9.5 \cdot 0.6 = 2166 \text{ ВАр} = 2.17 \text{ КВАр}; \\Q_{ca} &= U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_{ca} = 380 \cdot 19 \cdot 0.8 = 5776 \text{ ВАр} = 5.78 \text{ КВАр}.\end{aligned}$$

Для схемы соединения «звезда»:

$$\begin{aligned}Q_a &= U_a I_a \sin \varphi_a = 220 \cdot 4.5 \cdot 0 = 0; \\Q_b &= U_b I_b \sin \varphi_b = 220 \cdot 44 \cdot 0.8 = 7744 \text{ ВАр} = 7.744 \text{ КВАр}; \\Q_c &= U_c I_c \sin \varphi_c = 220 \cdot 22 \cdot 0.8 = 2904 \text{ ВАр} = 2.904 \text{ КВАр}.\end{aligned}$$

Общая реактивная мощность приемников при несимметричной нагрузке распределяется сложно между фазами линии, соединяющей источник с нагрузкой.

УКАЗАНИЕ: При симметричной нагрузке для схемы соединения «звезда» или «треугольник» реактивные мощности во всех фазах одинаковы и общая реактивная мощность трех фаз приемника вычисляется по формуле $Q = \sqrt{3}U_{\Delta}I_{\Delta} \sin \varphi_{\Phi}$ независимо от схемы его соединения.

3.9 Схема замещения приемников, соединенных «треугольником» при обрыве линейного провода, соединяющего точку «b» приемника с линией «В», представлена на рис. 3.7.

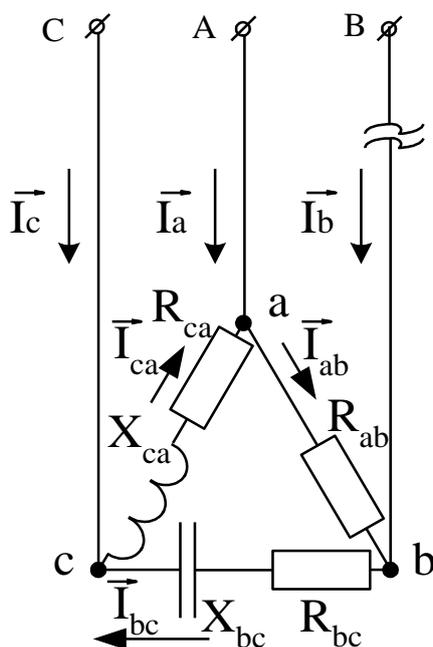


Рисунок 3.7 – Схема замещения приемников с соединением «треугольник» при обрыве линейного провода

При обрыве линейного провода $B-b$ на приемниках только одно напряжение, т.е. цепь из трехфазной преобразовывается в однофазную. Потребители, подключенные к фазам а-х и в-у (т.е. потребители, подключенные к зажимам $a-b$ и $b-c$) оказываются включенными между собой последовательно. Их общее сопротивление:

$$Z_{abc} = \sqrt{(R_{ab} + R_{bc})^2 + X_{bc}^2} = \sqrt{(10 + 32)^2 + 24^2} = 48,4 \text{ Ом};$$

$$\varphi_{abc} = \arctg \frac{X_{bc}}{R_{ab} + R_{bc}} = \arctg \frac{-24}{42} = -30^\circ;$$

$$I_{ab} = I_{bc} = \frac{U_{ca}}{Z_{abc}} = \frac{380}{48,4} = 7,85 \text{ А}.$$

По значениям I_{ab} и φ_{abc} строим вектор тока $\bar{I}_{ab} = \bar{I}_{bc}$ (рис. 3.7) относительно напряжения \bar{U}_{ca} . Ток в фазе $c-z$ (потребитель, подключенный к зажимам а-с) при обрыве линейного провода $B-b$ не изменился, поскольку напряжение осталось таким же, как и до обрыва. Таким образом, ток $I_{ca} = 19A$ и $\varphi_{ca} = 53^\circ$. В соответствии с этим на диаграмме (рис 3.8) строим вектор тока \bar{I}_{ca} . Токи в линиях А и С равны между собой:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_C = \bar{I}_{ab} + \bar{I}_{ca}.$$

Геометрическим суммированием векторов \bar{I}_{ab} и \bar{I}_{ca} на векторной диаграмме, определяем вектор $\bar{I}_A = \bar{I}_C$.

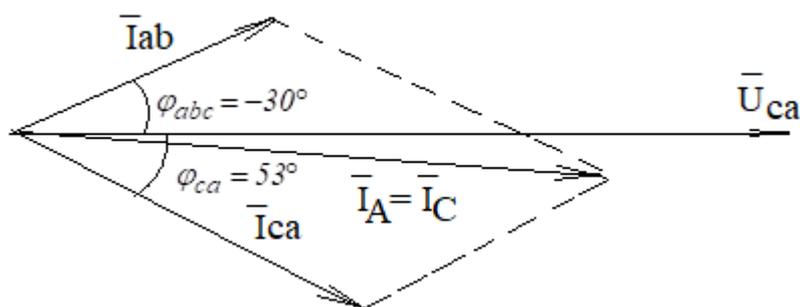


Рисунок 3.8 – Векторная диаграмма цепи при обрыве линейного провода

4. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

ЗАДАЧА 4.1. Классическим методом определить напряжение на реактивном элементе и токи переходного процесса в ветвях схемы рис.4.1, если известны постоянное напряжение источника и параметры электрической цепи (см. таблицу вариантов). Построить графики тока в неразветвленной части цепи и напряжения на реактивном элементе в функции времени t .

Таблица вариантов к задаче 4.1

1-я цифра варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U, B	200	100	300	400	500	150	250	350	120	220
$R, Ом$	50	40	150	100	160	90	60	100	30	80
$L, Гн$ (в схемах с L)	0.4	0.2	0.8	0.25	0.5	0.3	0.6	0.2	0.7	0.9
$C, мкФ$ (в схемах с C)	10	20	30	40	60	70	80	25	35	45

ЗАДАЧА 4.2. В условиях задачи 4.1 рассчитать токи переходного процесса операторным методом.

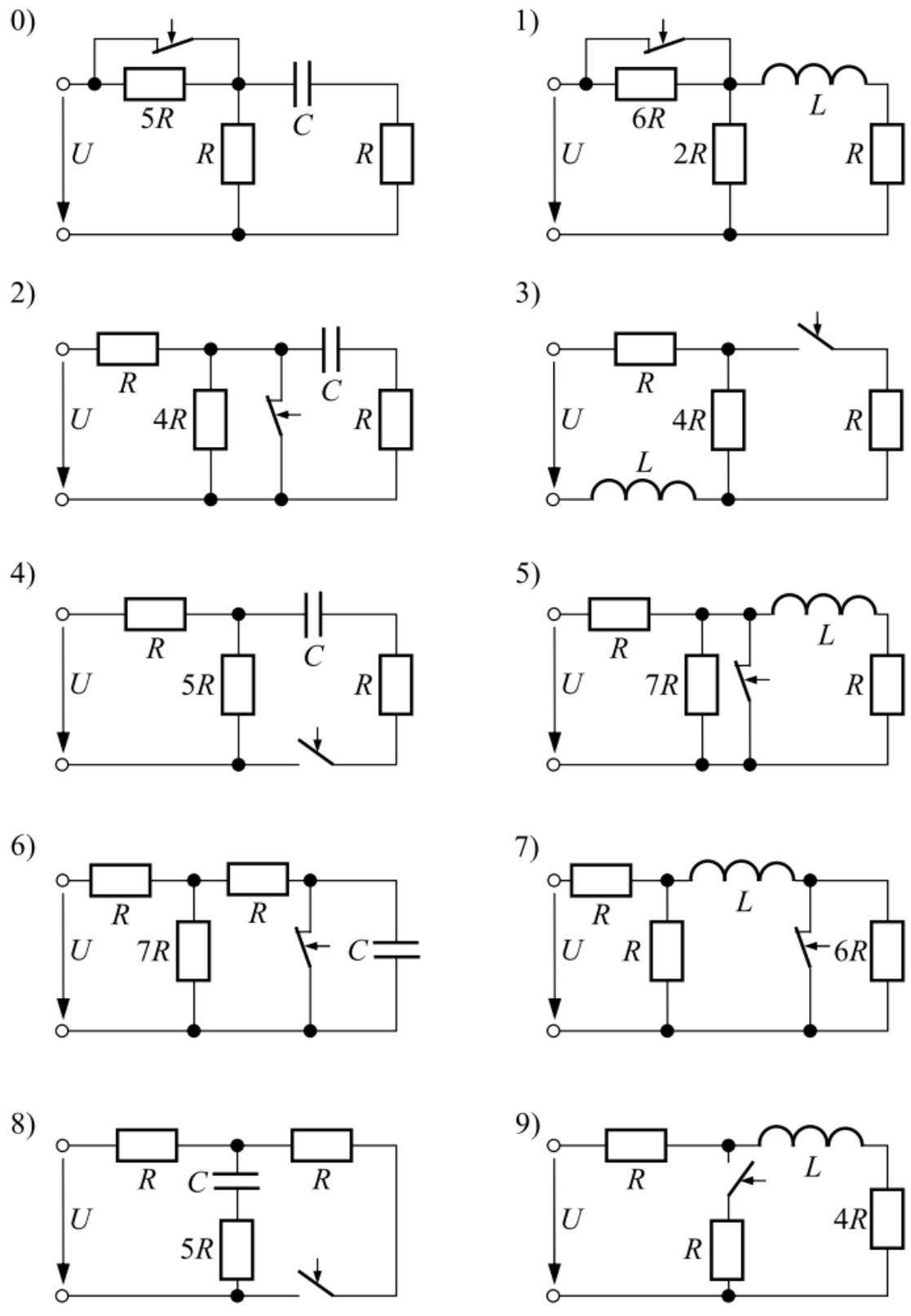


Рисунок 4.1 – Схема электрической цепи в переходном процессе

Типовой пример

«Расчет переходных процессов в цепи постоянного тока классическим методом»

Дано: $U_0 = 120 \text{ В}$, $L = 0,2 \text{ Гн}$, $R_1 = 15 \text{ Ом}$, $R_2 = 30 \text{ Ом}$, $R_3 = 15 \text{ Ом}$.

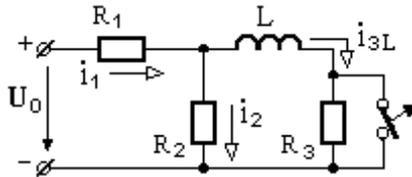


Рисунок 4.2 – Схема цепи в переходном режиме

В заданной цепи постоянного тока определить токи и напряжения в переходном процессе, построить один из графиков.

Решение

1. Расчётом цепи до коммутации (рис.4.3) находим независимые начальные условия процесса. Индуктивность не оказывает сопротивления постоянному току, поэтому:

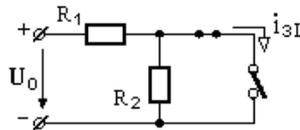


Рисунок 4.4 – Схема цепи до коммутации

$$i_{3L}(0+) = \frac{U_0}{R_1} = 120/15 = 8 \text{ А}$$

2. После коммутации, в установившемся режиме определяем принуждённые составляющие токов и напряжений.

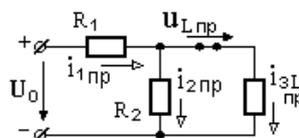


Рисунок 4.5 – Схема цепи после коммутации (в установившемся режиме)

$$i_{1np}(t) = \frac{U_0}{R_1 + R_2 \cdot R_3 / (R_2 + R_3)} = 4.8 \text{ А}$$

$$i_{2np}(t) = i_{1np}(t) \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 1.6 \text{ A}$$

$$i_{3Lnp}(t) = i_{1np}(t) \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 4.8 \cdot \frac{30}{30+15} = 3.2 \text{ A}; u_{Lnp}(t) = 0.$$

3 Для цепи после коммутации в свободном режиме составляем характеристическое уравнение и находим его корень.

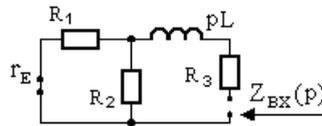


Рисунок 4.6 – Схема цепи для определения входного сопротивления цепи

$$Z_{BX}(p) = 0$$

$$R_3 + pL + R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 0;$$

$$pL + 25 = 0; p = -125 \text{ 1/c}; \tau = 0.008 \text{ c} = 8 \text{ мс}.$$

При вещественном отрицательном корне свободные составляющие токов и напряжений находят в виде затухающей экспоненты:

$$i_{1св}(t) = A_1 \cdot e^{-125t}, \text{ A}; \quad i_{3Lсв}(t) = A_3 \cdot e^{-125t}, \text{ A}$$

$$i_{2np}(t) = A_2 \cdot e^{-125t}, \text{ A}; \quad u_{Lсв}(t) = B \cdot e^{-125t}, \text{ В}.$$

4а. Чтобы отыскать постоянные интегрирования в этих выражениях, необходимо знать начальные значения токов и напряжения $i_q(0+)$, $u_q(0+)$ в цепи (рис.4.7) в первый момент после коммутации. Найдём их расчётом цепи в момент $t = 0+$; по МЗК $\rightarrow 1 + 2 = 3$ ур.

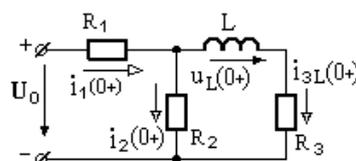


Рисунок 4.7 – Схема цепи в первый момент после коммутации

$$-i_1(0+) + i_2(0+) + i_{3L}(0+) = 0;$$

$$| R_1 \cdot i_1(0+) + R_2 \cdot i_2(0+) = U_0;$$

$$| u_L(0+) + R_3 \cdot i_{3L}(0+) - R_2 \cdot i_2(0+) = 0.$$

Отсюда получаем: $i_1(0+) = 8 \text{ A}$, $i_2(0+) = 0$, $i_{3L}(0+) = 8 \text{ A}$, $u_L(0+) = -120 \text{ В}$.

4б. Теперь находим сами постоянные интегрирования.

$$A_1 = i_1(0+) - i_{1\text{пр}}(0+) = 8 - 4.8 = 3.2 \text{ A};$$

$$A_2 = i_2(0+) - i_{2\text{пр}}(0+) = 0 - 1.6 = -1.6 \text{ A};$$

$$A_3 = i_{3L}(0+) - i_{3\text{пр}}(0+) = 8 - 3.2 = 4.8 \text{ A};$$

$$B = u_L(0+) - u_{L\text{пр}}(0+) = -120 - 0 = -120 \text{ В}.$$

5. Полные выражения токов и напряжений в переходном процессе записываем как суммы принуждённых и свободных составляющих:

$$i_1(t) = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}} = 4.8 + 3.2 e^{-125t}, \text{ A}; \quad i_{3L}(t) = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}} = 3.2 + 4.8 e^{-125t}, \text{ A};$$

$$i_2(t) = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}} = 1.6 - 1.6 e^{-125t}, \text{ A}; \quad u_L(t) = u_{\text{св}} = -120 e^{-125t}, \text{ В}.$$

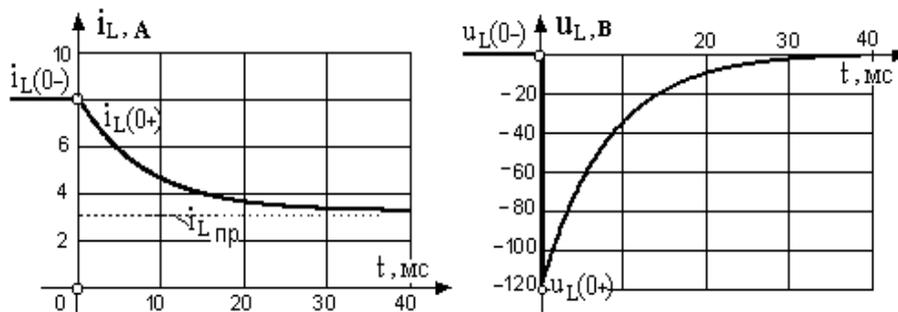


Рисунок 4.8 – График изменения тока i_{3L} и напряжения U_L в переходном процессе

На рис.4. представлены графики тока $i_{3L}(t)$ и напряжения $u_L(t)$. Напомним, здесь $\tau = 8 \text{ мс}$, $t_{\text{пр}} = 5 \tau = 40 \text{ мс}$. Обратим внимание на то, как на графиках хорошо видно, что ток i_{3L} подчиняется закону коммутации, т.е. $i_{3L}(0+) = i_{3L}(0-)$, а вот напряжение на индуктивности в момент коммутации изменяется скачком.

Типовой пример

«Расчет переходных процессов в цепи постоянного тока операторным методом»

Дано: $U_0 = 120 \text{ В}$, $L = 0,3 \text{ Гн}$, $C = 200 \text{ мкФ}$, $R_1 = 20 \text{ Ом}$, $R_2 = R_3 = 40 \text{ Ом}$.

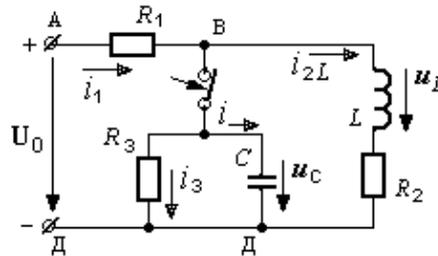


Рисунок 4.9 – Схема электрической цепи

Требуется токи и напряжения переходного процесса определить операторным методом.

Решение

1. Расчётом цепи до коммутации определяем независимые начальные условия процесса $i_L(0-)$, $u_C(0-)$ и записываем расчётные операторные э.д.с. $Li(0)$ и $u_C(0)/p$, учитывающие эти условия в дальнейшем расчёте.

По постоянному току докоммутационная цепь весьма проста. Ток $i_{2L}(0-)$ и напряжение $u_C(0-)$ запишутся:

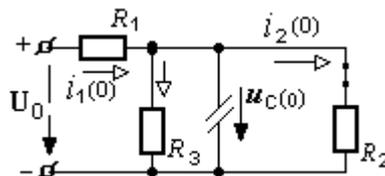


Рисунок 4.10 – Схема цепи до коммутации

$$i_{2L}(0-) = i_1(0-) \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{U_0}{R_{\text{до}}} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{120}{40} \cdot \frac{40}{40 + 40} = 1,5 \text{ А}$$

$$u_C(0-) = R_2 \cdot i_{2L}(0-) = 40 \cdot 1,5 = 60 \text{ В.}$$

Следовательно, расчётные э.д.с.: $Li(0) = 0,3 \cdot 1,5 = 0,45 \text{ В}$ и $u_C(0)/p = 60/p$.

2. Для цепи после коммутации составляем операторную схему замещения.

Напомним, э.д.с. $Li(0)$ направляется по току, э.д.с. $u_C(0)/p$ - встречно току.

После размыкания рубильника цепь распадается на две элементарные цепи, которые касаются друг друга в одной точке. В каждой из цепей изображение тока можно найти по закону Ома, а изображение напряжения – по II закону Кирхгофа.

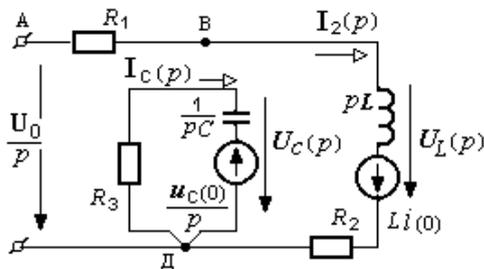


Рисунок 4.11 – Схема цепи после коммутации

$$I_{2L}(p) = \frac{U_0/p + Li(0)}{R_1 + R_2 + pL} = \frac{120 + 0,45p}{p(20 + 40 + 0,3p)} = \frac{1,5p + 400}{p(p + 200)} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)};$$

$$U_L(p) = pL \cdot I_{2L}(p) - Li(0) = 0,3p \cdot \frac{1,5p + 400}{p(p + 200)} - 0,45 = \frac{+30}{p + 200} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)};$$

$$I_C(p) = \frac{-u_c(0)/p}{R_3 + 1/pC} = \frac{-u_c(0) \cdot C}{40Cp + 1} = \frac{-u_c/40}{p + 1/40C} = \frac{-1,5}{p + 125} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)};$$

$$U_C(p) = \frac{1}{pC} \cdot I_C(p) + \frac{u_c(0)}{p} = \frac{1}{p \cdot 200 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{-1,5}{p + 125} + \frac{60}{p} = \frac{60}{p + 125};$$

3. Итак, изображения всех токов и напряжений найдены и сведены к виду рациональной дроби.

Изображения тока $I_C(p)$ и напряжений $U_C(p)$, $U_L(p)$ являются табличными функциями – это изображения экспонент. Поэтому их оригиналы можно записать сразу /см. табл. приложения Д, строка 2/:

$$\underline{i_C(t) = -1,5 \cdot e^{-125t}, \text{ А}; \quad \underline{u_C(t) = 60 e^{-125t}, \text{ В}; \quad \underline{u_L(t) = 30 \cdot e^{-200t}, \text{ В.}}$$

Оригинал тока индуктивности будем находить по формуле разложения. Для этого выполним следующую подготовку:

$$I_{2L}(p) = \frac{1,5p + 400}{p(p + 200)} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)};$$

$$F_2(p) = 0$$

$$F_1(p) = 1,5 p + 400;$$

$$F_2'(p) = 2 p + 200;$$

$$p_1 = 0$$

$$F_1(p_1) = + 400;$$

$$F_2'(p_1) = + 200;$$

$$p_2 = -200 \text{ 1/c}$$

$$F_1(p_2) = + 100;$$

$$F_2'(p_2) = - 200;$$

Теперь, в соответствии с формулой разложения, оригинал записываем в виде суммы экспонент, по числу корней знаменателя:

$$i_{2L}(t) = \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{F_2'(p_2)} e^{p_2 t} = \frac{400}{200} e^0 + \frac{100}{-200} e^{-200t} = 2 - 0,5e^{-200t} \text{ A}$$

4. ЛИТЕРАТУРА

Основная литература:

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Электронный ресурс] : учебник для бакалавров / Бессонов Лев Алексеевич ; Л.А. Бессонов. - 12-е изд., испр. и доп. - 297 Мб. - Москва : Юрайт, 2016. - 1 файл. - (Бакалавр. Углубленный курс). - Систем. требования: Acrobat Reader.

2. Аполлонский С.М. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Электроэнергетика и электротехника", "Электроника и микроэлектроника" / Аполлонский Станислав Михайлович, Виноградов Александр Леонидович ; С.М. Аполлонский, А.Л. Виноградов. - 4 Мб. - Москва : КНОРУС, 2016. - 1 файл. - (Бакалавриат). - Систем. требования: Acrobat Reader.

Дополнительная литература:

1. Матвиенко В.А. Основы теории цепей [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / Матвиенко Виталий Александрович ; В.А. Матвиенко. - 4 Мб. - Екатеринбург : УМЦ УПИ, 2016. - 1 файл. - Систем. требования: Acrobat Reader.

2. Батура М.П. Теория электрических цепей [Электронный ресурс] : учебник для вузов / Батура Михаил Павлович, Кузнецов Александр Петрович, Курулев Александр Петрович ; М.П. Батура, А.П. Кузнецов, А.П. Курулев ; под общ. ред. А.П. Курулева. - 3-е изд., перераб. - 23 Мб. - Минск: Высшая школа, 2015. - 1 файл. - Систем. требования: Acrobat Reader.

3. Немцов М.В. Электротехника [Электронный ресурс] : учебник для вузов : в 2 кн. Кн. 2 / Немцов Михаил Васильевич ; М.В. Немцов. - 54 Мб. - Москва : ИЦ "Академия", 2014. - 1 файл. - (Высшее образование. Бакалавриат). - Систем. требования: Acrobat Reader

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

1. Российское образование. Федеральный портал: [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.edu.ru>
2. Электронно-библиотечная система «eLibrary»: [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.elibrary.ru>
3. Электронно-библиотечная система «Буквоед»: [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://91.189.237.198:8778/poisk2.aspx>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В МАТРИЧНОЙ ФОРМЕ

Метод Крамера

Метод Крамера основан на использовании определителей в решении систем линейных уравнений. Это значительно ускоряет процесс решения.

Метод Крамера может быть использован в решении системы столько же линейных уравнений, сколько в каждом уравнении неизвестных. Если определитель системы не равен нулю, то метод Крамера может быть использован в решении, если же равен нулю, то не может. Кроме того, метод Крамера может быть использован в решении систем линейных уравнений, имеющих единственное решение.

Определитель, составленный из коэффициентов при неизвестных, называется определителем системы. и обозначается. При этом, следует различать главный определитель, который обозначается Δ (дельта) и частные определители, которые обозначаются Δ_{x_1} , Δ_{x_2} , Δ_{x_3} , соответственно.

Решить систему линейных уравнений методом Крамера:

$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + x_3 = 1 \\ 3x_1 - x_2 + 2x_3 = 1 \\ x_1 + 4x_2 - x_3 = 2 \end{cases} \quad (1)$$

Решение.

Находим определитель системы, пользуясь «правилом треугольников».

$$\Delta = \begin{vmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 3 & -1 & 2 \\ 1 & 4 & -1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \textcircled{1} & \textcircled{} & \textcircled{} \\ \textcircled{} & \textcircled{} & \textcircled{} \\ \textcircled{} & \textcircled{} & \textcircled{} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \textcircled{} & \textcircled{} & \textcircled{} \\ \textcircled{} & \textcircled{} & \textcircled{} \\ \textcircled{} & \textcircled{} & \textcircled{} \end{vmatrix} =$$

$$= 2 \cdot (-1) \cdot (-1) + 3 \cdot 4 \cdot 1 + 3 \cdot 2 \cdot 1 - (1 \cdot (-1) \cdot 1 - 3 \cdot 3 \cdot (-1) - 4 \cdot 2 \cdot 2) = 14 \quad (2)$$

Здесь имеются две главные диагонали: главная диагональ – положительная, побочная – отрицательная. При перемножении всех чисел, лежащих на главной диагонали, учитывается знак, при перемножении чисел, лежащих на побочной диагонали, знаки меняются на противоположные, как показано в (2).

Следовательно, система является определённой. Для нахождения её решения вычисляем частные определители. Частные определители отличаются тем, что в каждом определителе соответствующий столбец заменяется столбцом свободных членов и вычисляются аналогично (2):

$$\Delta_{x_1} = \begin{vmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 1 & -1 & 2 \\ 1 & 4 & -1 \end{vmatrix} = 14, \quad (3)$$

$$\Delta_{x_2} = \begin{vmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & -1 \end{vmatrix} = 0, \quad (4)$$

$$\Delta_{x_3} = \begin{vmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 3 & -1 & 1 \\ 1 & 4 & 2 \end{vmatrix} = -14. \quad (5)$$

По формулам Крамера находим:

$$x_1 = \frac{14}{14} = 1, \quad (6)$$

$$x_2 = \frac{0}{14} = 0, \quad (7)$$

$$x_3 = \frac{-14}{14} = -1. \quad (8)$$

Итак, $(1; 0; -1)$ – единственное решение системы.

Если в системе линейных уравнений в одном или нескольких уравнениях отсутствуют какие-либо переменные, то в определителе соответствующие им элементы равны нулю!

Другой способ вычисления определителей 3-его порядка

Определитель третьего порядка может быть вычислен с помощью определителей второго порядка по теореме о разложении определителя по первой строке:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix}$$

Для сравнения в соответствии с данными примера (2), приведенного выше, имеем:

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 3 & -1 & 2 \\ 1 & 4 & -1 \end{vmatrix} = 2 \begin{vmatrix} -1 & 2 \\ 4 & -1 \end{vmatrix} - 3 \begin{vmatrix} 3 & 2 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} + 1 \begin{vmatrix} 3 & -1 \\ 1 & 4 \end{vmatrix} =$$

$$= 2 \cdot ((-1) \cdot (-1) - 4 \cdot 2) - 3 \cdot (3 \cdot 1 - 1 \cdot 2) + 1 \cdot (3 \cdot 4 - (-1) \cdot 1) = 14$$

Правило Саррюса

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 3 & -1 & 2 \\ 1 & 4 & -1 \end{vmatrix} = 2(-1) \cdot (-1) + 3 \cdot 2 \cdot 1 + 1 \cdot 3 \cdot 4 - (1 \cdot (-1) \cdot 1) - (4 \cdot 2 \cdot 2) - ((-1) \cdot 3 \cdot 3) = 14$$

ИЛИ

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 3 & -1 & 2 \\ 1 & 4 & -1 \\ 2 & 3 & 1 \\ 3 & -1 & 2 \end{vmatrix} = 2(-1) \cdot (-1) + 1 \cdot 3 \cdot 4 + 3 \cdot 2 \cdot 1 - (1 \cdot (-1) \cdot 1) - (4 \cdot 2 \cdot 2) - ((-1) \cdot 3 \cdot 3) = 14$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Пример оформления титульного листа

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

**«КАМЧАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра «Энергетические установки и электрооборудование судов»

КУРСОВАЯ РАБОТА

На тему: «Расчет цепей постоянного и переменного тока»

Выполнил:

Проверил:

к.т.н., доцент

Петропавловск-Камчатский, 2024

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Пример оформления реферата

РЕФЕРАТ

Страниц , рисунков , таблиц..., источников

Цель работы – закрепление теоретического материала, приобретение необходимых навыков по расчету электрических цепей постоянного и переменного тока.

Выполнен расчет: цепей постоянного тока методом законов Кирхгофа (МЗК), методом контурных токов (МКТ), методом узловых потенциалов (МУП), методом эквивалентного генератора (МЭГ); однофазного и трехфазного переменного тока.

Правильность расчета цепей постоянного тока выполнена путем составления баланса мощностей и построением потенциальных диаграмм, однофазных и трехфазных – составлением баланса мощностей и построением векторных диаграмм.

**ЦЕПЬ, УЗЕЛ, ВЕТВЬ, КОНТУР, БАЛАНС, МОЩНОСТЬ, ПОТЕНЦИАЛ,
ДИАГРАММА, ФАЗА, ВЕКТОР, ДИАГРАММА, НЕЙТРАЛЬ, ПРОВОД, ТОК,
НАПРЯЖЕНИЕ, ЛИНИЯ**

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Пример оформления содержания

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ВВЕДЕНИЕ.....

1 РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....

1.1 Расчет токов методом законов Кирхгофа.....

1.2 Расчет токов методом контурных токов.....

1.3 Расчет токов методом узловых потенциалов.....

1.4 Расчет тока в ветви методом эквивалентного генератора (МЭГ).....

1.5 Построение потенциальной диаграммы.....

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....

Литература

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица соответствия изображений по Лапласу входных воздействий в электрических цепях

Оригинал функции	Изображение по Лапласу
$U_0, J_k, u_c(0)$	$\frac{U_0}{p}; \frac{J_k}{p}; \frac{u_c(0)}{p}$
$U_0 \cdot e^{\pm \alpha t}; 1 - 1 \cdot e^{-\alpha t}$	$U_0 \cdot \frac{1}{p \mp \alpha}; \frac{1}{p(p + \alpha)}$
$1 \cdot t; t \cdot e^{-\alpha t};$	$1 / p^2; 1 / (p + \alpha)^2$
$\sin(\omega t + \psi);$	$\frac{p \cdot \sin \psi + \omega \cdot \cos \psi}{p^2 + \omega^2}$
Теорема дифференцирования $[f'(t)]'$	$p \cdot F(p) - f(0)$
Вторая производная $[f''(t)]''$	$p^2 \cdot F(p) - p \cdot f(0) - f'(0)$
Теорема интегрирования $\int f(t) \cdot dt$	$F(p) / p$
Теорема запаздывания функции $f(t - \tau)$	$F(p) \cdot e^{-p\tau}$
Теорема свёртывания функции $\int_0^t f_1(\tau) \cdot f_2(t - \tau) d\tau$	Это теорема умножения изображений $F_1(p) \cdot F_2(p)$
Следствие теоремы свёртывания - интеграл Дюамеля $f(t) = f_1(0) \cdot f_2(t) + \int_0^t f_1'(\tau) \cdot f_2(t - \tau) d\tau; F(p) = pF_1(p) \cdot F_2(p)$	