

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

2171

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "МАМИ"

Кафедра «Электротехника и компьютеризированные
электрохимические системы»

О.В. Девочкин
А.А. Кецарис
В.Н. Полякова

Одобрено
методической комиссией
факультета ЭМиП

Электротехника
и основы электроники

Часть I. Электрические цепи

Методическое пособие к выполнению расчетно-
графических и контрольных работ для студентов высших
учебных заведений неэлектротехнических специальностей

БИБЛИОТЕКА
МГТУ МАМИ
УЧЕБНЫЙ ФОНД
Москва 2009

О.В. Девочкин

А.А. Кепарис

В.Н. Полякова

«Электротехника и основы электроники»

Часть I. Электрические цепи.

Методическое пособие к выполнению расчетно-графических и контрольных работ для студентов высших учебных заведений неэлектротехнических специальностей.

Стр.1 - 73, рис. 92, табл. 3, библи. МАМИ, 2009 г.

Цель предлагаемого пособия – оказать помощь студентам неэлектротехнических специальностей в изучении курса электротехники.

Методическое пособие содержит краткий справочный материал в виде основных положений и соотношений, расчетные формулы, типовые задачи с подробными решениями и пояснениями, а также задания и рекомендации для самостоятельного выполнения расчетно-графических работ.

ПРОГРАММА

Введение

Электрические цепи постоянного тока

Области применения электротехнических устройств постоянного тока. Структура электрической цепи. Генерирующие и приемные устройства. Стандартные графические обозначения электротехнических устройств постоянного тока. Схемы замещения электротехнических устройств. Линейные резистивные элементы, идеальные источники э. д. с. и тока, их свойства и вольт-амперные характеристики. Условные графические обозначения, применяемые на схемах замещения.

Линейные неразветвленные и разветвленные электрические цепи с одним источником э. д. с. Условные положительные направления э. д. с, токов и напряжений на схемах замещения. Пассивный и активный двухполосники. Режимы работы электрической цепи. Энергетический баланс в электрических цепях. Определение эквивалентных сопротивлений разветвленных пассивных линейных цепей. Взаимное преобразование схем соединений пассивных элементов треугольником и звездой. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной линейных электрических цепей с несколькими источниками э. д. с. путем непосредственного применения законов Кирхгофа. Методы контурных токов и узлового напряжения. Принцип суперпозиции. Принцип компенсации. Метод эквивалентного генератора.

Основные свойства и области применения четырехплечих мостовых цепей.

Нелинейные элементы и их характеристики (диод, стабилитрон, терморезистор). Анализ электрического состояния неразветвленных и разветвленных электрических цепей с нелинейными элементами.

Понятие о принципе построения электрических моделей объектов неэлектромагнитной природы.

Электрические цепи переменного тока

Особенности электромагнитных процессов в цепях с изменяющимися во времени токами. Генерирующие устройства переменного тока промышленной и высоких частот. Области применения и причины широкого распространения электротехнических устройств синусоидального тока промышленной частоты.

Однофазные цепи. Принцип действия простейшего однофазного электромагнитного генератора синусоидальной э. д. с. промышленной частоты. Основные параметры, характеризующие синусоидальную функцию. Начальная фаза. Сдвиг фаз. Мгновенное, амплитудное, действующее и среднее значения синусоидально изменяющихся электрических величин. Представление синусоидальных величин тригонометрическими функциями, графиками изменений функций во времени, вращающимися векторами и комплексными числами.

Электротехнические устройства переменного тока: источники э. д. с, резисторы, индуктивные катушки и конденсаторы. Стандартные графические обозначения

на схемах электротехнических устройств переменного тока. Схема замещения электротехнических устройств переменного тока. Идеальные элементы: резистивные, индуктивные и емкостные. Параметры (активное сопротивление, индуктивность, емкость) и характеристики (вольт-амперные, вебер-амперные, кулон-вольтные) идеальных элементов. Условные графические обозначения, применяемые на схемах замещений для изображения идеальных элементов. Законы Ома и Кирхгофа для цепей синусоидального тока.

Уравнение электрического состояния для неразветвленной цепи. Активное, реактивное и полное сопротивления двухполюсника. Комплексное сопротивление. Треугольник сопротивлений. Векторные диаграммы. Фазовые соотношения между токами и напряжениями. Понятие о потенциальных (топографических) диаграммах, Простейшие круговые диаграммы. Колебание энергии и мгновенная мощность элементов цепи. Активная, реактивная и полная мощность.

Треугольник мощностей. Коэффициент мощности и его экономическое значение. Выражение мощности в комплексной форме. Резонанс напряжений, условия его возникновения и практическое значение. Цепи с параллельным соединением ветвей. Уравнения электрического состояния цепи. Векторные диаграммы. Активная, реактивная и полная проводимости. Треугольник проводимостей. Комплексная проводимость. Резонанс токов, условия его возникновения и практическое значение.

Компенсация реактивной мощности для повышения коэффициента мощности. Анализ электрического состояния разветвленных цепей с применением комплексных чисел. Регулируемые и нерегулируемые фазовращающие устройства. Особенности и области применения четырехплечих мостовых устройств в цепях синусоидального тока. Магнитосвязанные электрические цепи. Анализ простейших цепей с учетом явления взаимоиндукции. Понятие о пассивных линейных четырехполюсниках.

Трехфазные цепи. Области применения трехфазных устройств. Простейший трехфазный генератор. Способы соединения трехфазной обмотки генератора. Представление электрических величин трехфазных систем тригонометрическими функциями, графиками, вращающимися векторами и комплексными числами. Условные положительные направления электрических величин в трехфазной системе. Фазные и линейные напряжения. Векторные диаграммы.

Способы включения в трехфазную сеть однофазных и трехфазных приемников. Четырехпроводная и трехпроводная трехфазные цепи. Симметричный режим трехфазной цепи. Соотношение между фазными и линейными напряжениями, фазными и линейными токами. Мощность трехфазной цепи. Понятие о работе трехфазной цепи при несимметричной нагрузке в четырехпроводной и трехпроводной цепях. Назначение нейтрального провода. Напряжение между нейтральными. Компенсация реактивной мощности для повышения

коэффициента мощности трехфазной установки. Измерение активной мощности (энергии) трехфазной системы методом двух и трех ваттметров (счетчиков), однолинейное изображение трехфазной цепи.

Переходные процессы в линейных электрических цепях. Причины возникновения переходных процессов в электрических цепях и их значение для работы цепей. Дифференциальные уравнения электрического состояния цепи. Установившиеся и свободные составляющие токов и напряжений. Законы коммутации и их использование для определения начальных условий. Влияние параметров цепи на длительность переходного процесса. Постоянная времени.

Переходные процессы при включении на зажимы источника постоянного напряжения неразветвленных цепей: с резистором и индуктивной катушкой, с резистором и конденсатором, с резистором, индуктивной катушкой и конденсатором. Понятие о характере протекания переходных процессов в цепи, содержащей индуктивную катушку и резистор, включаемые на зажимы источника синусоидального напряжения.

Разряд конденсатора на резистор. Простейший генератор пилообразного напряжения. Возникновение перенапряжения и дугового разряда на контактах при размыкании цепи, содержащей индуктивную катушку. Назначение разрядного резистора. Понятие о характере протекания переходных процессов при разряде конденсатора на цепь с резистором и индуктивной катушкой. Практическое использование переходных

процессов.

Применение цепей с резисторами, индуктивными катушками и конденсаторами для электрического моделирования процессов в механических, гидравлических и других системах.

Периодические несинусоидальные токи в электрических цепях. Причины возникновения периодических несинусоидальных э. д. с, токов и напряжений. Электрические цепи с вентилями. Представление периодических несинусоидальных функций рядами Фурье. Частотный спектр периодической несинусоидальной величины. Максимальное, среднее и действующее значения периодической несинусоидальной величины. Коэффициенты амплитуды, формы и искажения. Анализ линейных электрических цепей при несинусоидальном напряжении источника питания. Активная и полная мощности. Влияние индуктивных и емкостных элементов цепи на форму кривых токов и напряжений. Резонансные фильтры. Электрические схемы и принцип работы выпрямителей и сглаживающих фильтров. Понятие о дифференцирующих, интегрирующих и избирательных цепях.

Электромагнитные устройства и трансформаторы

Применение электромагнитных устройств постоянного и переменного токов в технике. Назначение магнитопровода. Свойства ферромагнитных материалов, используемых для

изготовления магнитопроводов электромагнитных устройств с постоянными и переменными магнитными полями. Неразветвленные и разветвленные магнитные цепи.

Магнитные цепи с постоянной магнитодвижущей силой (м. д. с). Реальная и идеальные магнитные цепи. Применение закона полного тока для анализа идеальной магнитной цепи. Магнитное сопротивление и проводимость. Схема замещения магнитной цепи. Веберамперные характеристики. Аналогия методов анализа электрических и магнитных цепей. Магнитные цепи при наличии воздушного зазора в магнитопроводе. Расчет тягового усилия электромагнита постоянного тока. Электромагнитные устройства постоянного тока: подъемные электромагниты, контакторы, реле и т. п. Их характеристики, свойства и области применения. Неразветвленная цепь с постоянным магнитом. Понятие о ее расчете. Область применения.

Магнитные цепи с переменной магнитодвижущей силой. Особенности магнитной цепи с переменной м. д. с. Реальная и идеальная катушки с магнитопроводом. Катушка с магнитопроводом как нелинейный индуктивный элемент и ее вольт-амперная характеристика. Способы уменьшения мощности потерь энергии на гистерезис и вихревые токи. Зависимости мгновенных значений магнитного потока и тока во времени при синусоидальном напряжении на катушке.

Эквивалентный синусоидальный ток. Уравнение электрического состояния, векторная диаграмма и

схема замещения катушки. Влияние воздушного зазора магнитопровода на вольт-амперную характеристику катушки. Полное сопротивление катушки. Электромагнитные устройства переменного тока с изменяемым воздушным зазором: дроссели, контакторы и т. п. Зависимость полного сопротивления от величины зазора. Понятие о ферромагнитном стабилизаторе напряжения.

Трансформаторы. Назначение и области применения трансформаторов. Однофазный трансформатор. Устройство и принцип действия трансформатора. Основной магнитный поток, потокосцепление рассеяния. Коэффициент трансформации. Условные положительные направления напряжений, токов, э. д. с. и магнитных потоков. Условные графические обозначения, применяемые для изображения трансформатора на электрических схемах. Уравнения электрического и магнитного состояний трансформатора. Реальный трансформатор. Идеальный трансформатор. Приведенный трансформатор. Векторная диаграмма и схема замещения. Опыты холостого хода и короткого замыкания, назначение и условия проведения. Потери энергии и к. п. д. Изменение вторичного напряжения при нагрузке и внешняя характеристика трансформатора.

Устройство, принцип действия и области применения трехфазных трансформаторов. Понятие о группах соединений обмоток. Устройство, принцип действия и области применения автотрансформаторов. Понятие о многообмоточных трансформаторах.

Измерительные трансформаторы тока и напряжений, назначение и свойства. Схемы включения измерительных трансформаторов и приборов. Погрешности измерений при использовании измерительных трансформаторов. Классы точности. Определение цены деления шкал измерительных приборов, включаемых с использованием измерительных трансформаторов.

Магнитные цепи с постоянной и переменной магнитодвижущими силами. Дроссель насыщения как управляемый нелинейный индуктивный элемент. Устройство и принцип действия простейшего магнитного усилителя. Схемы включения рабочих обмоток и обмоток управления. Характеристика управления. Коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности. Назначение обмоток обратной связи и смещения. Понятие о магнитных усилителях с самонамагничиванием. Понятие о дифференциальных магнитных усилителях. Области применения магнитных усилителей.

Основы электроники

Полупроводниковые приборы: транзисторы, полевые транзисторы и тиристоры. Электровакуумные триоды, пентоды и тиратроны. Основные характеристики и параметры.

Полупроводниковые и электронные усилители. Классификация усилителей. Однокаскадные усилители. Графический анализ работы усилителя с коллекторной нагрузкой. Основные параметры усилителя. Температурная стабилизация режима работы

усилителя. Влияние внутреннего сопротивления источника сигнала и сопротивления нагрузки на коэффициент усиления. Особенности усилителя на полевом транзисторе. Многокаскадные усилители. Двухкаскадный усилитель с RC -связью. Понятие о частотной характеристике. Усилители постоянного тока (УПТ). Основные свойства и характеристики. Дрейф нуля и способы его устранения. Балансные схемы УПТ.

Обратные связи в электронных устройствах. Влияние отрицательной обратной связи на параметры усилителей. Усилительный каскад с эмиттерной нагрузкой (эмиттерный повторитель). Усилители мощности (УМ). Однотактные и двухтактные УМ. Понятие об избирательных усилителях LC - и RC -типов.

Генераторы и импульсные устройства. Автогенераторы гармонических колебаний. Понятие об автогенераторах LC - и RC -типов. Использование импульсных устройств в промышленной электронике. Работа транзистора в режиме ключа. Электронные реле. Триггеры. Понятие о пересчетных устройствах.

Интегральные микросхемы (ИМС) и микроэлектроника. Необходимость перехода современной электроники к ИМС. Принципы построения ИМС.

Электрические измерения и приборы

Расширение понятия измерительного процесса. Сочетание измерений с функциями автоматического

контроля, сигнализации и управления. Преимущества электрических методов измерения неэлектрических величин. Понятие об электрическом преобразователе. Методы измерения: прямые и косвенные. Меры. Измерительные приборы непосредственного отсчета и приборы сравнения. Понятие об аналоговом и цифровом приборах.

Основные показатели качества измерительного устройства: точность, чувствительность, потребления энергии. Случайная и систематические погрешности в электрических измерениях. Погрешности метода в электрических измерениях. Погрешности косвенных измерений.

Измерительная цепь и измерительный механизм показывающего прибора. Устройство, принцип действия, основные свойства и области применения показывающих приборов магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и выпрямительной систем. Логометры. Счетчики электрической энергии. Обозначения на шкалах приборов. Определение цены деления шкалы. Погрешности и классы точности показывающих приборов.

Измерение токов, напряжений, сопротивлений, активной мощности и энергии. Общая оценка достижимых в настоящее время пределов чувствительности и точности измерений постоянных и переменных токов и напряжений. Понятие о мостовом методе измерений. Уравнение равновесия четырехплечевых мостов постоянного тока. Понятие об уравновешенных и неуравновешенных мостах.

Области применения мостов для измерения электрических величин. Мосты переменного тока и их применение для измерения неэлектрических величин с помощью параметрических преобразователей. Понятие о компенсационном методе измерений.

Особенности электронных измерительных приборов. Электронный осциллограф. Функциональная схема осциллографа и его применение. Электронный вольтметр. Функциональная схема вольтметра.

Электрические машины

Машины постоянного тока. Устройство машины постоянного тока. Коллектор и его назначение. Простейшие обмотки якоря. Возможность работы машины в режимах генератора и двигателя. Схема замещения цепи якоря. Преобразование энергии. Э. д. с. якоря и электромагнитный момент машины постоянного тока. Понятие о реакции якоря и коммутации. Потери энергии и к. п. д. машин постоянного тока.

Работа машины в режиме генератора. Генераторы постоянного тока независимого возбуждения и самовозбуждения. Характеристика холостого хода. Уравнение электрического состояния цепи якоря. Внешняя и регулировочная характеристики. Сравнительная оценка свойств и области применения генераторов постоянного тока различных способов возбуждения. Тахогенераторы.

Работа машины в режиме двигателя. Классификация двигателей постоянного тока по способу возбуждения. Уравнение электрического состояния цепи якоря. Пуск двигателя. Назначение пускового реостата. Зависимости магнитного потока и электромагнитного момента двигателей разных способов возбуждения от тока якоря. Механические характеристики двигателей. Регулирование скорости вращения. Понятие о тормозных режимах двигателей постоянного тока. Реверсирование. Сравнительная оценка свойств двигателей постоянного тока разных способов возбуждения и области применения. Особенности устройства исполнительных двигателей постоянного тока. Понятие об универсальных коллекторных двигателях.

Асинхронные машины. Устройство трехфазной асинхронной машины. Возбуждение вращающегося магнитного поля трехфазной симметричной системой токов. Скорость вращения поля. Направление вращения.

Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя и области применения. Конструкция фазного и короткозамкнутого роторов. Графическое изображение асинхронного двигателя на электрических схемах. Скорость вращения ротора и его поля. Скольжение. Зависимость частоты и величины э. д. с. и тока в фазе обмотки ротора от скольжения. Схема замещения фазы трехфазного асинхронного двигателя. Преобразования энергии, происходящие в асинхронном двигателе. Активная, электромагнитная и полезная мощности двигателя.

Потери энергии и к. п. д. двигателя. Реактивная, мощность и коэффициент мощности двигателя. Электромагнитный момент двигателя и его зависимость от величин скольжения и напряжения сети. Механическая характеристика двигателя. Перегрузочная способность двигателя. Пуск двигателя. Рабочие характеристики двигателя. Асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми свойствами. Регулирование скорости вращения. Понятие о работе асинхронных машин в качестве тормоза и генератора. Области применения трехфазных асинхронных двигателей. Понятие о линейных асинхронных двигателях.

Принцип действия, механические характеристики, свойства и области применения однофазных асинхронных двигателей. Однофазные двигатели с пусковыми элементами и конденсаторные двухфазные двигатели. Двигатели с расщепленными полюсами. Двухфазные исполнительные двигатели с полым немагнитным ротором. Асинхронный тахогенератор. Понятие об устройстве, принципе действия и области применения поворотных трансформаторов.

Понятие об устройстве, принципе действия и области применения однофазных сельсинов с трехфазной обмоткой синхронизации.

Синхронные машины. Устройство трехфазных синхронных машин с электромагнитным возбуждением. Области применения синхронных машин. Графическое изображение синхронной машины на электрических схемах.

Работа синхронной машины в режиме генератора. Работа генератора на автономную нагрузку. Магнитное поле машины. Э. д. с. и электромагнитный момент. Схема замещения фазы обмотки статора неявнополюсного синхронного генератора. Уравнение электрического состояния фазы обмотки статора. Векторная диаграмма.

Электромагнитная мощность. Внешние характеристики синхронного генератора. Работа трехфазного синхронного генератора параллельно с сетью. Включение генератора на параллельную работу с сетью. Регулирование активной мощности. Угловые характеристики. Предел устойчивости и выпадение из синхронизма. Регулирование реактивной мощности генератора. U-образные характеристики.

Работа синхронной машины в режиме двигателя. Схема замещения. Пуск двигателя. Уравнение электрического состояния и векторная диаграмма фазы обмотки статора. Электромагнитный момент двигателя. Механическая и U-образная характеристики двигателя. Влияние величины тока возбуждения на коэффициент мощности двигателя. Понятие о принципе действия и назначении синхронного компенсатора.

Устройство, принцип действия и области применения синхронных двигателей малой мощности: реактивных, гистерезисных и шаговых.

Принципы выбора электродвигателей.

Аппаратура управления и защиты электротехнических устройств

Определение понятия электропривода. Значение электропривода в автоматизации производственных процессов. Понятие об установившихся и переходных процессах электроприводов. Типовые режимы работы электропривода. Техно-экономическое значение правильного выбора мощности электродвигателя. Условия, определяющие выбор мощности двигателя. Нагрев и охлаждение. Классы изоляции. Понятие о нагрузочных диаграммах и принципах их построения. Продолжительность включения. Приближенные методы выбора мощности при длительном и повторно-кратковременном режимах работы электродвигателя. Особенности выбора мощности электродвигателя по нагреву и перегрузочным способностям при его работе с постоянной и переменной нагрузками. Выбор электродвигателя по каталогу.

Понятие об управлении электроприводами. Аппаратура управления и защиты электротехнических устройств. Контактные, конечные выключатели и реле. Условные графические обозначения аппаратуры на схемах. Типовые схемы управления. Общие принципы релейно-контактного и бесконтактного управления электротехническими устройствами.

Понятие о схемах электроснабжения, выборе сечения проводов и тепловой защите электроустановок.

Раздел I. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Методические указания по темам курса

Электрические цепи постоянного тока

Приступая к изучению данного раздела, необходимо иметь представление о типах генерирующих устройств, их внешних характеристиках и режимах работы, а также об основных видах приемных устройств и их условных обозначениях. Следует знать основные законы и понимать свойства линейных электрических цепей. Необходимо уметь анализировать электрическое состояние цепей с нелинейными резистивными элементами. После изучения данного раздела студенты должны:

1. знать области применения электротехнических устройств постоянного тока, способы соединения электрических устройств, методику составления уравнений электрического состояния линейных цепей, примеры нелинейных элементов и их вольт-амперные характеристики;

2. понимать эквивалентность схем источников э. д. с: и тока, смысл вольт-амперных характеристик приемных и внешних характеристик генерирующих устройств, сущность энергетических процессов, происходящих в генерирующих приемных устройствах, возможности осуществления взаимных преобразований схем соединений пассивных элементов треугольником и звездой, замены нелинейного элемента эквивалентной схемой замещения с линейными элементами, проведения анализа линейных электрических цепей методами контурных токов,

суперпозиции, пропорциональных величин;

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

Приступая к расчету электрических цепей, необходимо иметь четкое представление о схемах соединения (последовательное, параллельное, смешанное) как приемников, так и источников электрической энергии. В ряде случаев приходится иметь дело и с более сложными соединениями, к которым относятся многоугольники и звезды. Наиболее часто встречаются соединения треугольником и трехлучевой звездой. При расчете электрических цепей обычно пользуются законами Ома и Кирхгофа. Электрические цепи разделяются на цепи с одним и с несколькими источниками.

Анализ цепей с одним источником проводится двумя методами: методом свертывания схемы (определение входного или эквивалентного сопротивления) и методом пропорциональных величин (метод подобия).

При анализе цепи с несколькими источниками используются метод непосредственного применения законов Кирхгофа, методы контурных токов (ячеек),

суперпозиции (наложения), узлового напряжения (если в схеме имеется два узла) и эквивалентного генератора (для нахождения тока в одной из ветвей схемы).

В большинстве случаев при расчете электрических цепей известными (заданными) величинами являются электродвижущие силы (э. д. с), напряжения или токи источников электрической энергии и сопротивления резисторов, неизвестными (рассчитываемыми) величинами являются токи и напряжения приемников.

Анализ электрических цепей постоянного тока с одним источником

Рассмотрим электрическую цепь, схема которой изображена на рис. 1. Пусть известны значения сопротивления резисторов $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$, э. д. с. E и ее внутреннее сопротивление R_0 . Требуется определить токи во всех участках цепи и напряжение, которое покажет вольтметр (сопротивление его бесконечно велико), включенный между точками схемы a и d .

Такие задачи решаются методом свертывания схемы, по которому отдельные участки схемы упрощают и постепенным преобразованием приводят схему к одному эквивалентному (входному) сопротивлению относительно зажимов источников питания. Схема упрощается с помощью замены группы последовательно или параллельно соединенных резисторов одним эквивалентным по сопротивлению. Так, резисторы R_4 и R_5 соединены последовательно, а резистор R_6 — с ними параллельно, поэтому их эквивалентное сопротивление

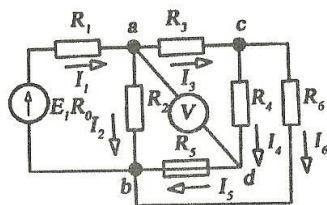


Рис. 1

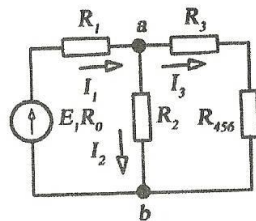


Рис. 2

$$R_{456} = R_4 R_5 / (R_4 + R_5), \text{ где } R_{45} = R_4 + R_5.$$

После произведенных преобразований схема принимает вид, показанный на рис. 2, а эквивалентное сопротивление всей цепи найдем из уравнения.

$$R_{\text{эк}} = R_0 + R_1 + \frac{R_2(R_3 + R_{456})}{R_2 + R_3 + R_{456}}$$

Ток I_1 в неразветвленной части схемы определим по закону Ома: $I_1 = E / R_{\text{эк}}$

Воспользовавшись схемой (рис. 2), найдем токи I_2 и I_3

$$I_2 = I_1 \frac{R_3 + R_{456}}{R_2 + R_3 + R_{456}}; I_3 = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_{456}}$$

Переходя к рис. 1, определим токи I_4, I_5 и I_6 по аналогичным уравнениям:

$$I_4 = I_5 = I_3 \frac{R_6}{R_4 + R_5 + R_6}; I_6 = I_3 \frac{R_4 + R_5}{R_4 + R_5 + R_6}$$

Зная ток I_1 , можно найти ток I_2 по-другому. Согласно второму закону Кирхгофа, $U_{ab} = E - (R_0 + R_1)I_1$, тогда $I_2 = U_{ab} / R_2$

Показания вольтметра можно определить, составив уравнение по второму закону Кирхгофа, например, для контура $acda$: $R_3 I_3 + R_2 I_2 = U_{ad}$. Для проверки решения можно воспользоваться первым законом Кирхгофа и уравнением баланса мощностей, которые для схемы, изображенной на рис. 1, примут вид

$$I_1 = I_2 + I_3; I_3 = I_4 + I_6;$$

$$EI_1 = (R_0 + R_1)I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + (R_4 + R_5)I_4^2 + R_6 I_6^2$$

Электрические цепи с одним источником можно рассчитывать методом подобия (метод пропорциональных величин), который применим только для расчета линейных цепей, т. е. цепей с неизменными значениями сопротивлений. Воспользуемся свойствами линейных цепей для определения токов схемы, изображенной на рис. 1, в такой последовательности: задаемся произвольным значением тока I'_6 в резисторе R_6 , наиболее удаленном от источника питания. По заданному току I'_6 и сопротивлению резистора R_6 определяем напряжение $U'_{cb} = R_6 I'_6$.

Далее определяем

$$I'_4 = I'_5 = U'_{cb} / (R_4 + R_5); I'_3 = I'_4 + I'_6$$

$$U'_{ac} = R_3 I'_3; U'_{ab} = U'_{ac} + U'_{cb}$$

$$I'_2 = U'_{ab} / R_2; I'_1 = I'_2 + I'_3$$

Наконец, находим значение э.д.с. E' : $E' = (R_0 + R_1)I'_1 + R_2I'_2$. Однако найденное значение э. д. с. E' в общем случае отличается от заданной величины э. д. с. E . Поэтому для определения действительных значений токов и напряжений вычисляем так называемый коэффициент подобия $K = E/E'$. Умножив на него полученные при расчете значения токов и напряжений, находим действительные значения токов цепи. Метод пропорциональных величин особенно эффективен при расчете разветвленных линейных электрических цепей с одним источником.

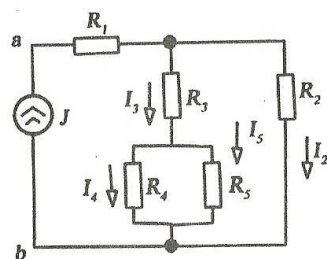


Рис. 3

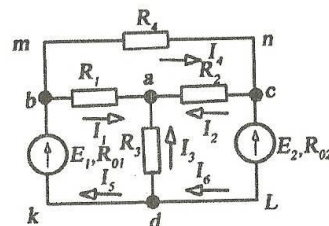


Рис. 4

Методы общего анализа линейных электрических цепей с несколькими источниками

Важным вопросом этого раздела является расчет распределения токов в сложных линейных цепях с несколькими источниками. Классическим методом расчета таких цепей является **непосредственное применение законов Кирхгофа**. Все остальные методы расчета исходят из этих фундаментальных

законов электротехники.

Рассмотрим сложную электрическую цепь (рис. 4), которая содержит шесть ветвей. Если будут заданы значения всех э. д. с. и сопротивлений резисторов, а по условию задачи требуется определить токи в ветвях, то имеем задачу с шестью неизвестными. Такие задачи решаются с помощью законов Кирхгофа. В этом случае должно быть составлено столько уравнений, сколько неизвестных токов. Порядок расчета следующий.

1. Если цепь содержит последовательные и параллельные соединения, то ее упрощают, заменяя эти соединения эквивалентными.

2. Произвольно указывают направления токов во всех ветвях. Если принятое направление тока не совпадает с действительным, то при расчете такие токи получаются со знаками минус.

3. Составляют $(n-1)$ уравнений по первому закону Кирхгофа (n — число узлов).

4. Недостающие уравнения в количестве $m-(n-1)$, где m — число ветвей, составляют по второму закону Кирхгофа, при этом обход контура можно производить как по часовой стрелке, так и против нее. За положительные э. д. с. и токи принимаются такие, направление которых совпадает с направлением обхода контура. Направление действия э. д. с. внутри источника всегда принимают от минуса к плюсу (см. рис. 4)

5. Полученную систему уравнений решают относительно неизвестных токов. Составим расчетные

уравнения для электрической цепи, изображенной на (рис. 4.) Выбрав произвольно направление токов в ветвях цепи, составляем уравнения по первому закону Кирхгофа для a, b, c :

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 &= 0 \\ I_5 - I_1 - I_4 &= 0 \\ I_4 - I_2 - I_6 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Приняв направление обхода контуров по часовой стрелке, составляем уравнения по второму закону Кирхгофа для трех произвольно выбранных контуров:

для контура $adkba$

$$R_1 I_1 - R_3 I_3 + R_{01} I_5 = E \quad (2)$$

для контура $bacldkb$

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_{01} I_5 + R_{02} I_6 = E_1 - E_2 \quad (3)$$

для контура $bmncab$

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_4 I_4 = 0 \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (1), (2), (3) и (4), определяем токи в ветвях электрической цепи.

Легко заметить, что решение полученной системы из шести уравнений является весьма трудоемкой операцией. Поэтому при анализе электрических цепей с несколькими источниками целесообразно применять **метод контурных токов** (метод ячеек), позволяющий уменьшить число совместно решаемых уравнений, составляемых по двум законам Кирхгофа, на число уравнений, записанных по первому закону Кирхгофа.

Следовательно, число уравнений, составляемых по методу контурных токов, равно $m - n + 1$. При решении этим методом количество уравнений определяется числом ячеек. Ячейкой называют такой контур, внутри которого отсутствуют ветви. В данном случае таких контуров-ячеек три: $badkb, aclda, mncabm$.

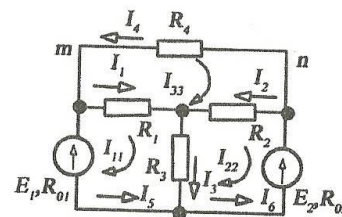


Рис. 5

Расчет сложных электрических цепей методом контурных токов ведется следующим образом.

1. Вводя понятие «контурный ток», произвольно задаемся направлением этих токов в ячейках. Удобнее все токи указать в одном направлении, например по часовой стрелке (рис. 5).

2. Составляем для каждого контура-ячейки уравнение по второму закону Кирхгофа. Обход контуров производим по часовой стрелке:

первый контур

$$(R_{01} + R_1 + R_3) I_{11} - R_3 I_{22} - R_1 I_{33} = E_1 \quad (5)$$

второй контур

$$-R_3 I_{11} + (R_{02} + R_2 + R_3) I_{22} - R_2 I_{33} = -E_2 \quad (6)$$

третий контур

$$-R_1 I_{11} - R_2 I_{22} + (R_1 + R_2 + R_4) I_{33} = 0 \quad (7)$$

3. Решая совместно уравнения (5), (6), (7), определяем контурные токи. В том случае, когда контурный ток получается со знаком минус, это означает, что его направление противоположно выбранному на схеме.

4. Токи во внутренних ветвях схемы определяются как сумма или разность соответствующих контурных токов. В том случае, когда контурные токи в ветви совпадают, берут сумму, а когда направлены навстречу — из большего тока вычитают меньший.

5. Токи во внешних ветвях схемы по значению равны соответствующим контурным токам.

Задача 1. Найти токи в цепи, схема которой изображена на рис. 5. Задано: $E_1 = 100\text{В}$, $E_2 = 120\text{В}$, $R_{01} = R_{02} = 0,5\text{Ом}$, $R_1 = 5\text{Ом}$, $R_2 = 10\text{Ом}$, $R_3 = 2\text{Ом}$, $R_4 = 10\text{Ом}$. Определить токи в ветвях цепи. Решение. Используя уравнения (5), (6) и (7), получаем;

$$\left. \begin{aligned} 7,5I_{11} - 2I_{22} - 5I_{33} &= 100 \\ -2I_{11} + 12,5I_{22} - 10I_{33} &= -120 \\ -5I_{11} - 10I_{22} + 25I_{33} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Выразив I_{33} через I_{11} и I_{22} :

$$I_{33} = \frac{5}{25} I_{11} + 10I_{22}$$

и произведя соответствующие подстановки, получаем

$$6,5I_{11} - 4I_{22} = 100,$$

$$-4I_{11} + 8,5I_{22} = -120.$$

Совместное решение полученных уравнений дает:

$$I_{11} = -5,2\text{А}; I_{22} = -33,5\text{А}; I_{33} = -14,4\text{А}$$

Определяем токи в ветвях:

$$I_1 = I_{11} - I_{33} = -5,2 + 14,4 = 9,2\text{А};$$

$$I_2 = I_{33} - I_{22} = -14,4 + 33,5 = 19,1\text{А};$$

$$I_3 = I_{11} - I_{22} = -5,2 + 33,5 = 28,3\text{А};$$

В промышленной электронике, автоматике часто используют цепи, схема которых изображена на рис 5,а. Такие схемы удобно анализировать с помощью метода узлового напряжения (напряжения между двумя узлами).

Задача 2. Найти токи и показание вольтметра в цепи; схема которой приведена на рис. 5,а, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10\text{Ом}$.

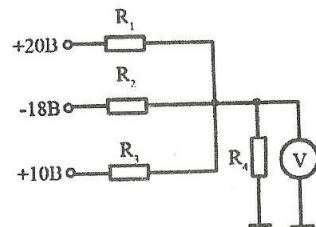


Рис. 5а

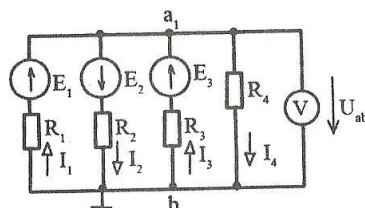


Рис. 5б

Решение. Рис. 5,а соответствует схеме замещения (рис. 5, б): $E_1=20\text{В}$, $E_2=18\text{В}$, $E_3=10\text{В}$. Найдем узловое напряжение U_{ab} (показание вольтметра):

$$U_{ab} = \frac{G_1 E_1 - G_2 E_2 + G_3 E_3}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4} = \frac{0,1 \cdot 20 - 0,1 \cdot 18 + 0,1 \cdot 10}{0,4} = 3\text{В}.$$

Токи в ветвях определяются по закону Ома

$$I_1 = (E_1 - U_{ab}) / R_1 = 1,7\text{А}; \quad I_2 = (E_2 + U_{ab}) / R_2 = 2,1\text{А};$$

$$I_3 = (E_3 - U_{ab}) / R_3 = 0,7\text{А}; \quad I_4 = U_{ab} / R_4 = 0,3\text{А}.$$

Электрические цепи переменного тока Однофазные цепи

В результате изучения данного раздела студенты должны:

1) знать содержание терминов: резистор, сопротивление, индуктивная катушка, индуктивность, индуктивное сопротивление, конденсатор, емкость, емкостное сопротивление, фаза, начальная фаза, угол сдвига фазы, период, частота, угловая частота, мгновенное, действующее и среднее значения гармонических величин, полное, активное, реактивное, комплексное сопротивления и проводимости; полная, активная, реактивная, комплексная мощности; характеристики и параметры элементов схем замещения цепей однофазного тока; условия и способы получения резонансов напряжений и токов;

2) понимать особенности электромагнитных процессов и энергетические соотношения в цепях синусоидального тока, экономическое значение коэффициента мощности, особенности анализа простейших электрических цепей с магнитосвязанными элементами;

3) уметь составлять дифференциальные и комплексные уравнения электрического состояния линейных цепей; представлять гармонически изменяющиеся величины тригонометрическими функциями, графиками, вращающимися векторами и комплексными числами; строить векторные диаграммы неразветвленных цепей и цепей с параллельным соединением ветвей; определять

опытным путем параметры схем замещения пассивных двухполосников; с помощью электроизмерительных приборов измерять токи, напряжения и мощности в электрических цепях; строить потенциальные (топографические) диаграммы для неразветвленных цепей и цепей с параллельным соединением ветвей.

При изучении явлений резонанса в цепях переменного тока необходимо знать условия их возникновения, а также обратить внимание на практическое применение резонанса токов для искусственного повышения коэффициента мощности в промышленных электроустановках. В то же время следует понимать, что возникновение резонанса в электрических устройствах может представлять опасность как для самих устройств, так и для обслуживающего персонала.

Изучая явления резонанса, необходимо усвоить следующее. При резонансе напряжение и ток на зажимах цепи всегда совпадают по фазе. Настройка же цепи на резонанс зависит от схемы соединения индуктивности и емкости. Для последовательной цепи условием резонанса является равенство индуктивного и емкостного сопротивлений: $X_L = X_C$. Для цепи, содержащей параллельный контур, в одной из ветвей которого находится индуктивная катушка, а в другой — конденсатор, условием резонанса является равенство реактивных проводимостей ветвей: $B_L = B_C$.

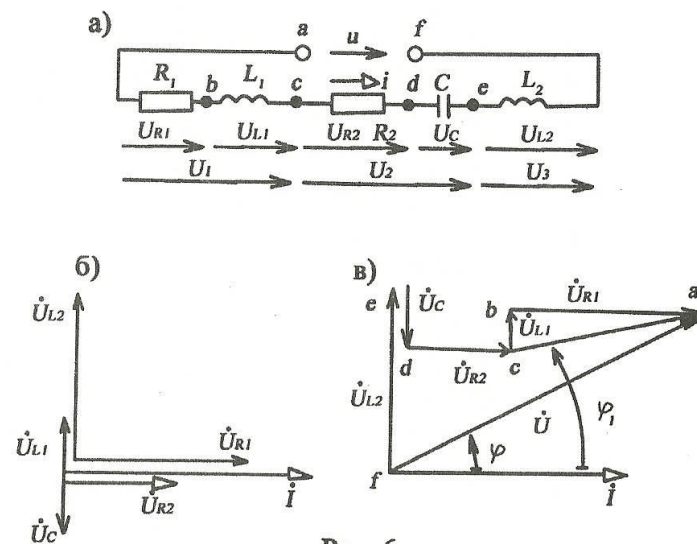


Рис. 6

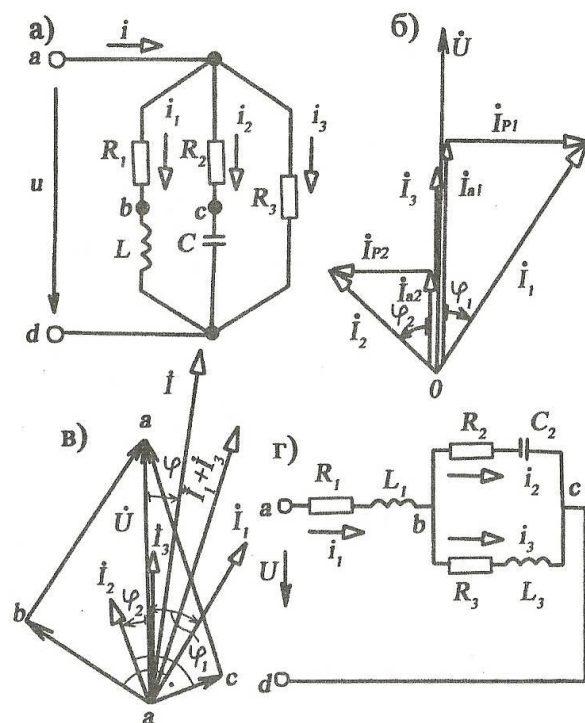


Рис. 7

При расчете цепей синусоидального тока приходится совершать различные математические операции, которые удобно производить над действующими значениями токов и напряжений, рассматривая их как векторы. Значения векторов при этом равны действующим токам и напряжениям, а начальная фаза

определяет положение вектора относительно положительной горизонтальной оси координат. При положительной (опережающей) начальной фазе вектор повернут на соответствующий угол против движения часовой стрелки, а при отрицательной (отстающей) — по направлению движения часовой стрелки. Векторной диаграммой называют совокупность векторов, изображающих синусоидальные э. д. с, напряжения и токи одной частоты, выходящих из общей точки.

При построении векторных диаграмм один из векторов принимают за основной (опорный), располагая его обычно по положительному направлению горизонтальной оси. В этом случае начальная фаза тока или напряжения в зависимости, от того, что данный вектор изображает, равна нулю. Для последовательной цепи за основной вектор принимают вектор тока, а для параллельной — вектор напряжения.

На рис. 6 показаны последовательная цепь (рис. 6, а) и ее векторные диаграммы. (рис. 6, б, в) На рис. 7 в той же последовательности, что и на рис. 6, показаны параллельная цепь и ее векторные диаграммы.

В том случае, когда сложение или вычитание вектора требуется производить не графически, а математически (например, при расчете электрической цепи), векторы раскладывают на две составляющие, одна из которых называется активной, а вторая — реактивной. Активная составляющая напряжения совпадает по фазе с током, а реактивная — опережает ток или отстает от него по фазе на 90° . Активная

составляющая тока совпадает по фазе с напряжением, а реактивная — опережает напряжение или отстает от него по фазе на 90° . Зная сдвиг между током и напряжением и значения векторов тока и напряжения, легко определить соответствующие составляющие этих векторов. Например, если нам задан синусоидально изменяющийся ток уравнением вида $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$, его активная и реактивная составляющие для действующего значения соответственно равны $I_a = I \cos \varphi$, $I_p = I \sin \varphi$, где $I = I_m / \sqrt{2}$. Аналогично для напряжений: $U_a = U \cos \varphi$; $U_p = U \sin \varphi$. На диаграмме, изображенной на рис. 7,б, показаны активные и реактивные составляющие токов.

В том случае, когда необходимо произвести сложение двух или более векторов, выражающих собой токи или напряжения, определяют их активные и реактивные составляющие и модуль результирующего вектора:

$$I = \sqrt{(\sum I_a)^2 + (\sum I_L - \sum I_C)^2};$$

$$U = \sqrt{(\sum U_a)^2 + (\sum U_L - \sum U_C)^2},$$

где индексы L и C указывают на характер реактивной составляющей (индуктивность или емкость). Начальная фаза результирующего вектора определяется через $\operatorname{tg} \varphi$:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sum I_L - \sum I_C}{\sum I_a} = \frac{\sum U_L - \sum U_C}{\sum U_a}$$

Для практических расчетов удобнее выражать

векторы тока и напряжения, а также сопротивления и проводимость комплексными числами, в которых активные составляющие являются действительными значениями, а реактивные — мнимыми. Причем знак у мнимого значения зависит от характера реактивной составляющей. При расчете электрических цепей переменного тока с помощью комплексных чисел могут быть использованы методы расчета, применяемые для цепей постоянного тока. Уравнения Кирхгофа в этом случае записываются как соответствующие геометрические суммы.

При выполнении расчетов по методу комплексных чисел следует иметь в виду, что действительная и мнимая части комплексных сопротивлений, проводимости и мощности всегда представляют собой соответственно активную и реактивную составляющие этих значений; что же касается комплексного напряжения и комплексного тока, то такое положение имеет место лишь в частных случаях. Действительная и мнимая части комплексных напряжения и тока определяются начальными фазами значений, иначе говоря, зависят от расположения соответствующих векторов относительно осей комплексной плоскости, тогда как их активная и реактивная составляющие определяются углом сдвига по фазе φ между этими двумя векторами.

При анализе магнитосвязанных электрических цепей необходимо иметь в виду, что при составлении уравнения по второму закону Кирхгофа, при учете напряжения от взаимной индукции сравнивается напряжение обхода рассматриваемой катушки и

направление тока во влияющей на нее катушке относительно одноименных зажимов катушек. Если эти направления совпадают, то напряжение взаимной индукции учитывается в уравнении с плюсом, в противном случае — с минусом.

Задача 1. Рассчитать электрическую цепь синусоидального тока со смешанным соединением приемников, схема которой изображена на рис. 7, г. Дано: $U = 120\text{В}$, $R_1 = 10\text{Ом}$, $R_2 = 24\text{Ом}$, $R_3 = 15\text{Ом}$, $L_1 = 19,1\text{мГ}$, $C_2 = 455\text{мкФ}$, $L_3 = 63,5\text{мГ}$, $f = 50\text{Гц}$.

Определить токи $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$, $\dot{I}_3$, в ветвях цепи, напряжения на участках цепи $\dot{U}_{ab}$, $\dot{U}_{bc}$, активную, реактивную и полную мощности и построить векторную диаграмму на комплексной плоскости.

Решение. Выражаем сопротивления ветвей цепи в комплексной форме:

$$\underline{Z} = R \pm jX = Ze^{\pm j\varphi};$$

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = 10 + j2\pi \cdot 50 \cdot 19,1 \cdot 10^{-3} = 10 + j6\text{Ом}.$$

Переходя от алгебраической формы записи комплексного числа к показательной, получаем:

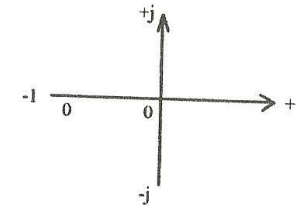
$$\underline{Z}_1 = Z_1 e^{j\varphi_1} = 11,6 e^{j31^\circ} \text{Ом},$$

$$\text{где } Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}; \quad \text{tg } \varphi_1 = \frac{\omega L_1}{R_1};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - j \frac{1}{\omega C_2} = 24 - j \frac{10^6}{2\pi \cdot 50 \cdot 455} = 24 - j7\text{Ом} = 25 e^{-j16^\circ 15'} \text{Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j\omega L_3 = 15 + j2\pi \cdot 50 \cdot 63,5 \cdot 10^{-3} = 15 + j20\text{Ом} = 25 e^{+j53^\circ 05'} \text{Ом}.$$

Выражаем заданное напряжение U в комплексной форме. Если начальная фаза напряжения не задана, то ее можно принять равной нулю и располагать вектор напряжения совпадающим с положительным направлением действительной оси. В этом случае мнимая составляющая комплексного числа



отсутствует

Рис. 8

(рис. 8) $\dot{U} = U = 120\text{В}$, Полное комплексное сопротивление цепи

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 10 + j6 + \frac{(24 - j7)(15 + j20)}{39 + j13} = \\ &= 10 + j6 + \frac{25 e^{-j16^\circ 15'} \cdot 25 e^{+j53^\circ 05'}}{48 e^{+j18^\circ 25'}} = 24,4 + j10,8 = 26,7 e^{+j23^\circ 55'} \text{Ом}. \end{aligned}$$

Определяем ток в неразветвленной части цепи

$$\dot{I}_1 = \dot{U} / \underline{Z} = 120 / 26,7 e^{+j23^\circ 55'} = 4,5 e^{-j23^\circ 55'} \text{А}.$$

Токи $\dot{I}_2$ и $\dot{I}_3$ в параллельных ветвях могут быть выражены через ток в неразветвленной части цепи:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 4,5e^{-j23^\circ 55'} \frac{15 + j20}{39 + j13} = 2,74e^{+j10^\circ 45'} A;$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 4,5e^{-j23^\circ 55'} \frac{24 - j7}{39 + j13} = 2,74e^{-j58^\circ 35'} A.$$

Токи I_2 и I_3 можно найти иначе:

$$\dot{U}_{bc} = \underline{Z}_{bc} \dot{I}_1 = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} \dot{I}_1 = \frac{(24 - j7)(15 + j20)}{39 + j13} \times 4,5e^{-j23^\circ 55'} = 68,4e^{-j5^\circ 30'} B;$$

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_{bc} / \underline{Z}_2 = 68,4e^{-j5^\circ 30'} / 25e^{-j16^\circ 15'} = 2,74e^{+j10^\circ 45'} A;$$

$$\dot{I}_3 = \dot{U}_{bc} / \underline{Z}_3 = 68,4e^{-j5^\circ 30'} / 25e^{+j53^\circ 05'} = 2,74e^{-j58^\circ 35'} A.$$

Найдем мощности всей цепи и отдельных ее ветвей:

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* = 120 \cdot 4,5e^{+j23^\circ 55'} = 540e^{+j23^\circ 55'} B \cdot A.$$

Для определения активной и реактивной мощностей полную мощность, выраженную комплексным числом в показательной форме, переводим в алгебраическую форму. Тогда действительная часть комплекса представляет собой активную мощность, а мнимая - реактивную:

$$\underline{S} = 540 \cos 23^\circ 55' + j540 \sin 23^\circ 55' = 494 + j218 B \cdot A,$$

Откуда $P = 494 Bm$; $Q = 218 var$.

Активную и реактивную мощности можно найти иначе:

$$P = \operatorname{Re} \left[\dot{U} \dot{I}_1^* \right] = \operatorname{Re} \left[120 \cdot 4,5e^{j23^\circ 55'} \right] = 120 \cdot 4,5 \cos 23^\circ 55' = 494 Bm;$$

$$P_1 = R_1 I_1^2 = 10 \cdot 4,5^2 = 202 Bm; \quad P_2 = R_2 I_2^2 = 180 Bm;$$

$$P_3 = R_3 I_3^2 = 112 Bm$$

Проверка показывает, что $P = P_1 + P_2 + P_3$

$$Q = \operatorname{Im} \left[\dot{U} \dot{I}_1^* \right] = \operatorname{Im} \left[120 \cdot 4,5e^{j23^\circ 55'} \right] = 120 \cdot 4,5 \sin 23^\circ 55' = 218 var$$

$$Q_1 = X_1 I_1^2 = 6 \cdot 4,5^2 = 122 var; \quad Q_2 = X_2 I_2^2 = -52,5 var;$$

$$Q_3 = X_3 I_3^2 = 150 var.$$

Учитывая, что Q_1 и Q_3 положительны (реактивная мощность индуктивных катушек), а Q_2 отрицательно (реактивная мощность конденсатора), получим $Q = Q_1 - Q_2 + Q_3 = 218 var$.

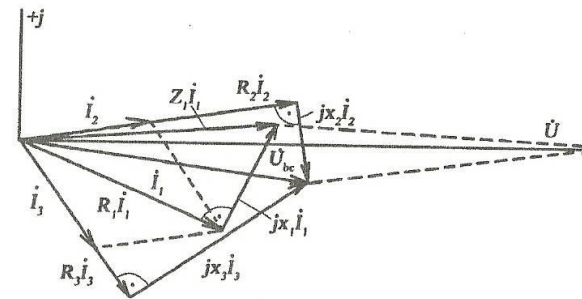


Рис. 9

На рис. 9 приведена векторная диаграмма токов и напряжений, построенная по расчетным данным. Порядок ее построения следующий: по результатам

расчетов отложены векторы токов $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ и $\dot{I}_3$; затем по направлению $\dot{I}_1$ отложен вектор $R\dot{I}_1$ и перпендикулярно к нему в сторону опережения - вектор $jX_1\dot{I}_1$. Их сумма дает вектор $Z_1\dot{I}_1$. Далее в фазе с $\dot{I}_2$ построен вектор $R_2\dot{I}_2$ и перпендикулярно к нему в сторону отставания вектор $jX_2\dot{I}_2$, а их сумма дает вектор напряжения на параллельном участке $\dot{U}_{bc}$. Тот же вектор можно получить, если в фазе с $\dot{I}_3$ отложить $R_3\dot{I}_3$ и к нему прибавить вектор $jX_3\dot{I}_3$, опережающий $\dot{I}_3$ на 90° . Сумма векторов $Z_1\dot{I}_1$ и $\dot{U}_{bc}$ дает вектор приложенного напряжения $\dot{U}$.

Трехфазные цепи.

При изучении этого раздела особое внимание необходимо обратить на преимущества, которые дает трехфазная система по сравнению с однофазной. Рассматривая схемы соединения обмоток генераторов, надо уяснить связь между фазными и линейными напряжениями в схеме соединения звездой, а также связь между фазными и линейными токами в схеме соединения треугольником.

Необходимо четко представить, что в трехфазной цепи могут быть два режима: симметричный и несимметричный. Расчет трехфазной цепи в симметричном режиме сводится к расчету для одной фазы и производится аналогично расчету однофазной

цепи с одним источником. Трехфазная цепь может рассматриваться как разветвленная цепь с тремя источниками питания, и для ее расчета применяются методы, используемые при расчете электрических цепей с несколькими источниками. Например, если несимметричный приемник соединен без нейтрального провода, то для расчета трехфазной цепи можно применить метод узлового напряжения в комплексной форме.

После изучения настоящего раздела студенты должны:

1) знать основные элементы трехфазных цепей, способы соединения фаз обмотки генератора и включения в трехфазную цепь приемников; способы изображения трехфазной симметричной системы э.д.с.

2) понимать роль нейтрального провода; принципы построения потенциальных диаграмм; влияние рода и схемы включения нагрузки на величину тока в нейтральном проводе, схемы электроснабжения предприятий;

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

Задача 1. В трехфазную сеть с линейным напряжением $\dot{U}_\Delta = 220V$ включен приемник, соединенный треугольником, сопротивление каждой фазы которого $\underline{Z} = (10 + j10)\Omega$ (рис 10). Найти токи в

каждой фазе нагрузки и линии и показания каждого ваттметра. Построить векторную диаграмму. Найти те же величины при обрыве цепи в точке d .

Р е ш е н и е. Расчет токов в трехфазных цепях производится комплексным методом. Примем, что вектор линейного напряжения $\dot{U}_{AB}$ направлен по действительной оси, тогда

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab} = 220B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc} = 220e^{-j120^\circ} B;$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca} = 220e^{j120^\circ} B.$$

Определяем фазные токи:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / \underline{Z} = 220 / (10 + j10) = 15,6e^{-j45^\circ} = 11 - j11A;$$

$$\dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / \underline{Z} = 220e^{-j120^\circ} / (10 + j10) = 15,6e^{-j165^\circ} = -15 - j4,03A;$$

$$\dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / \underline{Z} = 220e^{j120^\circ} / (10 + j10) = 15,6e^{j75^\circ} = 4,03 + j15A.$$

Находим линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 6,97 - j26 = 26,9e^{-j75^\circ} A;$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = -26 + j6,97 = 26,9e^{-j156^\circ} A;$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 19 + j19 = 26,9e^{j45^\circ} A.$$

Определяем показания ваттметров:

$$P_1 = \operatorname{Re}[\dot{U}_{AB} \dot{I}_A] = \operatorname{Re}[220 \cdot 26,9e^{j75^\circ}] = \\ = 220 \cdot 26,9 \cos 75^\circ = 1530Bm;$$

$$P_2 = \operatorname{Re}[\dot{U}_{CB} \dot{I}_C] = \operatorname{Re}[-220e^{-j120^\circ} \cdot 26,9e^{-j45^\circ}] = \\ = \operatorname{Re}[220e^{j60^\circ} \cdot 26,9e^{-j45^\circ}] = 220 \cdot 26,9 \cos 15^\circ = 5730Bm.$$

Активную мощность цепи (алгебраическая сумма показаний ваттметров)

$$P = P_1 + P_2 = 1530 + 5730 = 7260Bm$$

или

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 26,9 \cos 45^\circ = 3RI_{\phi}^2 = 7260Bm$$

На рис. 11 приводится векторная диаграмма напряжений и токов.

При обрыве в точке d токи в фазах нагрузки будут:

$$\dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / \underline{Z} = 220e^{-j120^\circ} / (10 + j10) = -15 - j4,03A;$$

$$\dot{I}_{ab} = \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{cb} / 2\underline{Z} = -220e^{-j120^\circ} / 2(10 + j10) = 7,5 + j2,02A.$$

Вычислим линейные токи:

$$\dot{I}_A = 0; \quad \dot{I}_C = -\dot{I}_B = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 22,5 + j6,05 = 23,3e^{j15^\circ} A.$$

Находим показания ваттметров: $P_1 = 0$;

$$P_2 = \operatorname{Re}[\dot{U}_{cb} \dot{I}_C] = \operatorname{Re}[220e^{j60^\circ} \cdot 23,3e^{-j15^\circ}] = \\ = 220 \cdot 23,3 \cos 45^\circ = 3630Bm;$$

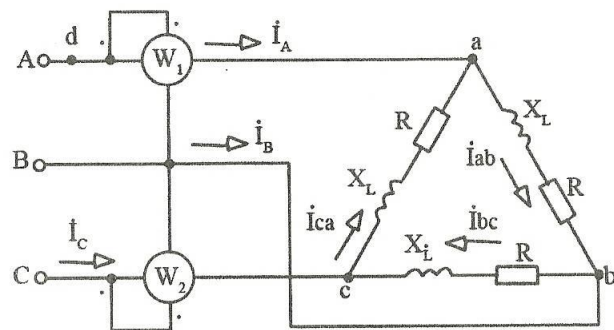


Рис. 10

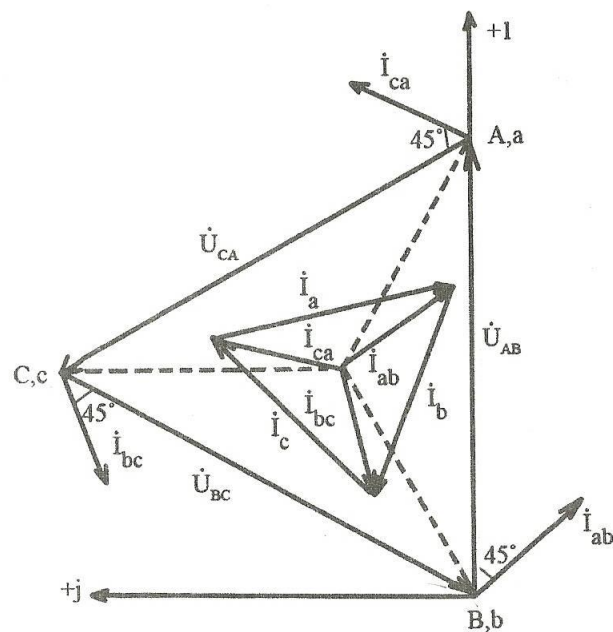


Рис. 11

Задача 2. В четырехпроводную трехфазную сеть с линейным напряжением $\dot{U}_n = 220\text{В}$ включен звездой приемник, активные и индуктивные сопротивления фаз которого соответственно равны: $R_a = 3\text{Ом}$, $X_a = 4\text{Ом}$, $R_b = 3\text{Ом}$, $X_b = 5,2\text{Ом}$, $R_c = 4\text{Ом}$, $X_c = 3\text{Ом}$ (рис. 12). Определить токи в линейных и нейтральном проводах и построить векторную диаграмму.

Решение. Считаем, что вектор фазного напряжения $\dot{U}_a$ направлен по действительной оси, тогда $\dot{U}_a = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 127\text{В}$, $\dot{U}_b = 127e^{-j120^\circ}\text{В}$, $\dot{U}_c = 127e^{j120^\circ}\text{В}$.

Находим линейные токи:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a = 127 / (3 + j4) = 127 / (5e^{j53^\circ}) = 25,4e^{-j53^\circ}\text{А};$$

$$\dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b = 127e^{-j120^\circ} / (3 + j5,2) = 127e^{-j120^\circ} / (6e^{j60^\circ}) = 21,2e^{-j180^\circ}\text{А};$$

$$\dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c = 127e^{j120^\circ} / (4 + j3) = 127e^{j120^\circ} / (5e^{j37^\circ}) = 25,4e^{j83^\circ}\text{А}.$$

Ток в нейтральном проводе определяется как геометрическая сумма линейных токов:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 25,4e^{-j53^\circ} + 21,2e^{-j180^\circ} + 25,4e^{j83^\circ} = 5,9e^{j124^\circ}\text{А}.$$

Векторная диаграмма показана на рис. 13

При несимметричной нагрузке для определения

активной мощности находят мощность каждой фазы отдельно: $P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi$, а мощность всей трехфазной системы получают как сумму мощностей всех фаз или используют схему включения двух ваттметров.

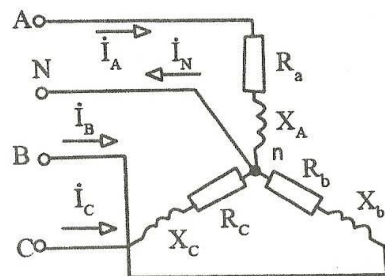


Рис. 12

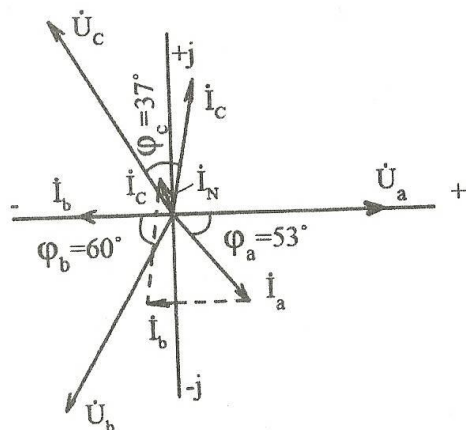


Рис. 13

Задача 3. В трехфазную сеть с линейным напряжением $U_\lambda = 380V$ включен звездой приемник,

активное, индуктивное и емкостное сопротивления фаз которого равны: $R_a = X_b = X_c = 22 \Omega$ (рис. 14). Определить токи и построить векторную диаграмму.

Решение. Расчет токов производим комплексным методом. Находим фазные э.д.с.:

$$E_\phi = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}} = 380/1,73 = 220V.$$

$$\dot{E}_A = 220V; \quad \dot{E}_B = 220e^{-j120^\circ} = (-110 - j191)V;$$

$$\dot{E}_C = 220e^{j120^\circ} = (-110 + j191)V.$$

Определяем напряжение между нейтральными точками приемника и источника питания:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{nN} &= \frac{Y_a \dot{E}_A + Y_b \dot{E}_B + Y_c \dot{E}_C}{Y_a + Y_b + Y_c} = \\ &= \frac{\frac{1}{22} \cdot 220 + j \frac{1}{22} (-110 - j191) - j \frac{1}{22} (-110 + j191)}{\frac{1}{22} + j \frac{1}{22} - j \frac{1}{22}} = 602V. \end{aligned}$$

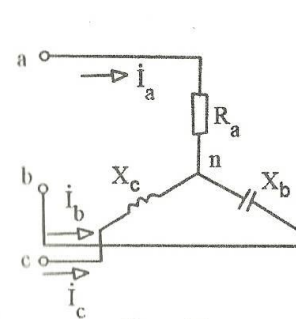


Рис. 14

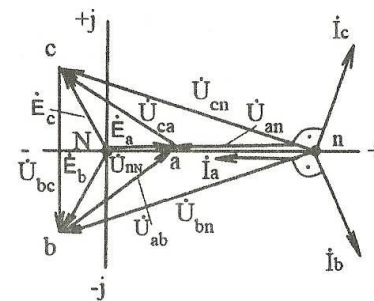


Рис. 15

Находим напряжения на зажимах фаз приемника:

$$\dot{U}_{an} = 220 - 602 = -382B;$$

$$\dot{U}_{bn} = (-110 - j191) - 602 = (-712 - j191)B;$$

$$\dot{U}_{cn} = (-110 + j191) - 602 = (-712 + j191)B$$

и фазные (линейные) токи:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_{an} / R_a = -382 / 22 = -17,3A;$$

$$\dot{I}_b = \dot{U}_{bn} / (-jX_b) = (-712 - j191) / (-j22) = (8,68 - j32,4)A;$$

$$\dot{I}_c = \dot{U}_{cn} / (jX_c) = (-712 + j191) / j22 = (8,68 + j32,4)A;$$

Векторная диаграмма изображена на рис 15.

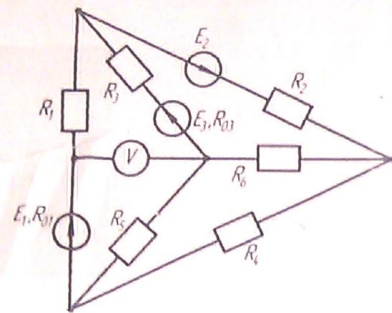
Для подсчета активной мощности в данной схеме можно воспользоваться уравнениями, записанными для схемы включения двух ваттметров. Из рассмотрения этой задачи следует, что напряжения на зажимах фаз приемника получаются неодинаковыми. Поэтому несимметричные приемники (бытовые и т.д.) соединяют либо четырехпроводной звездой, либо треугольником.

Задание.

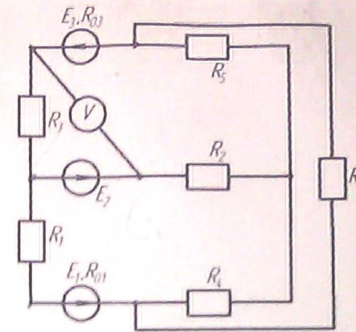
Задача № 1

Для схемы, изображённой на рис. 1-1 – 1-50, используя значения параметров табл. 1;

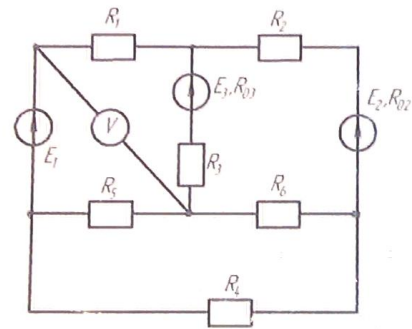
1. Составить систему уравнений для расчета неизвестных токов, используя законы Кирхгофа.
2. Рассчитать токи ветвей методом контурных токов.
3. Методом 2-х узлов рассчитать токи эквивалентной схемы, полученной после преобразования треугольника сопротивлений R4, R5, R6 в эквивалентную звезду.
4. Определить показания вольтметра.
5. Рассчитать баланс мощности.



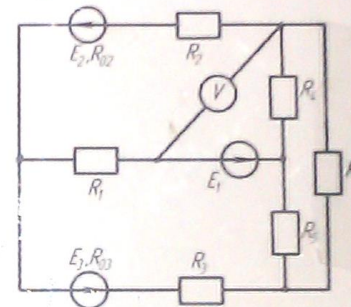
Puc. 1-1



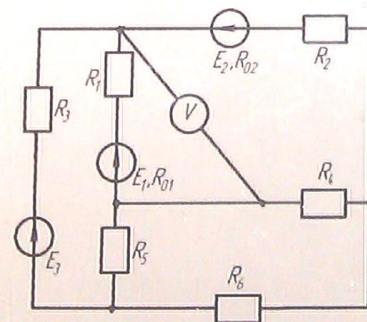
Puc. 1-2



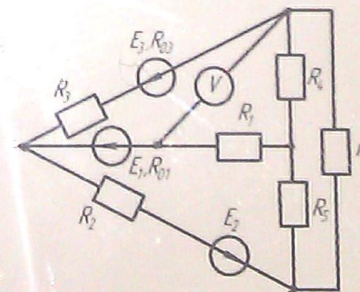
Puc. 1-3



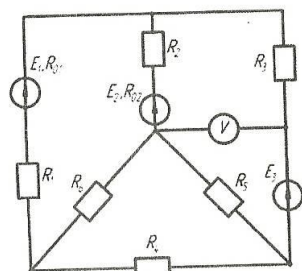
Puc. 1-4



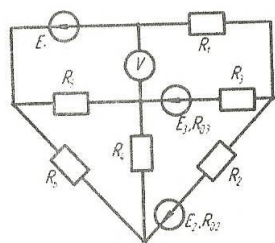
Puc. 1-5



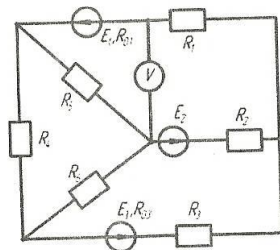
Puc. 1-6



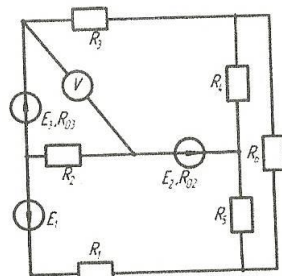
Puc. 1-7



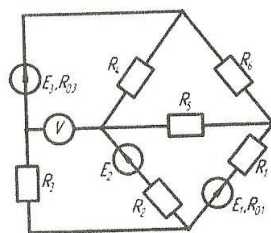
Puc. 1-9



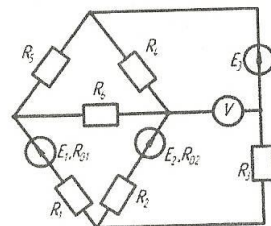
Puc. 1-11



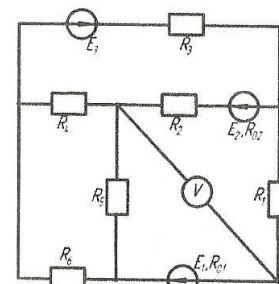
Puc. 1-8



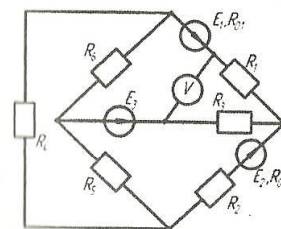
Puc. 1-10



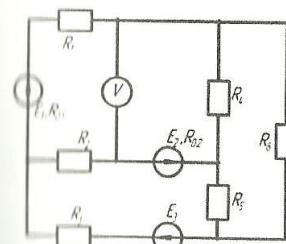
Puc. 1-12



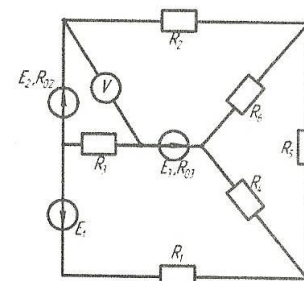
Puc. 1-13



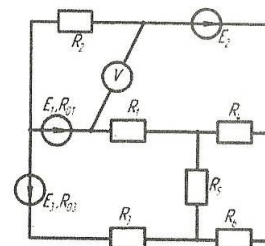
Puc. 1-15



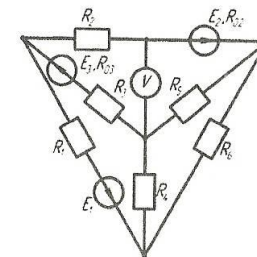
Puc. 1-17



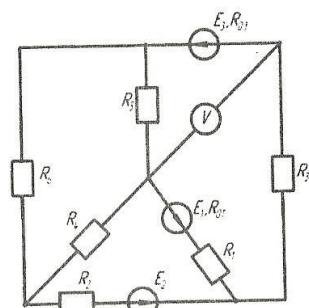
Puc. 1-14



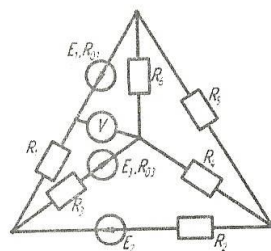
Puc. 1-16



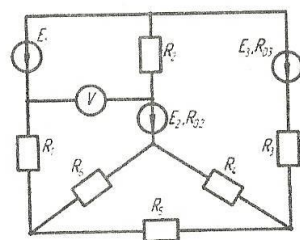
Puc. 1-18



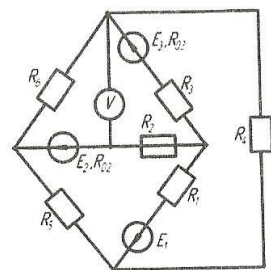
Puc. 1-19



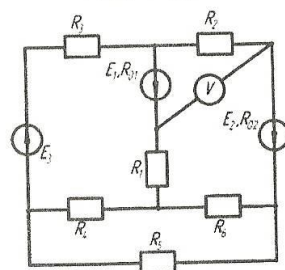
Puc. 1-21



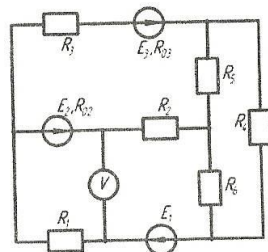
Puc. 1-23



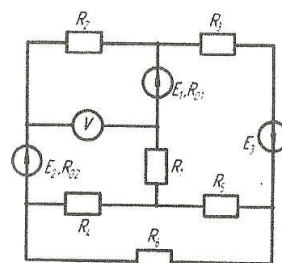
Puc. 1-20



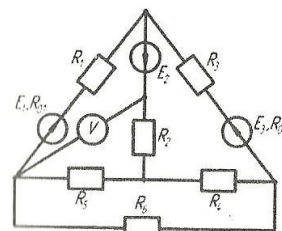
Puc. 1-22



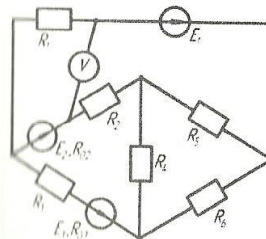
Puc. 1-24



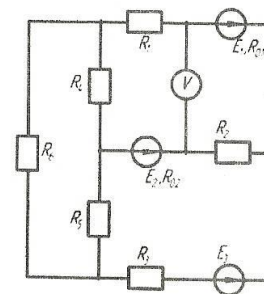
Puc. 1-25



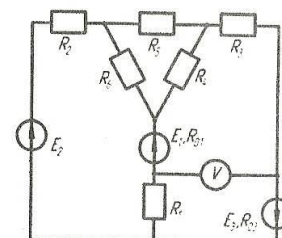
Puc. 1-27



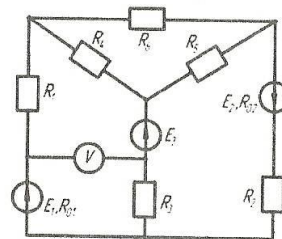
Puc. 1-29



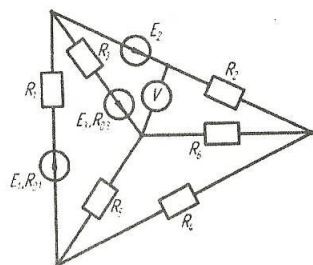
Puc. 1-26



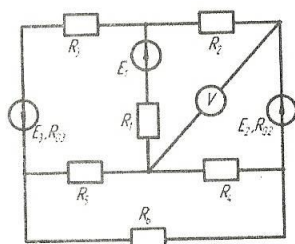
Puc. 1-28



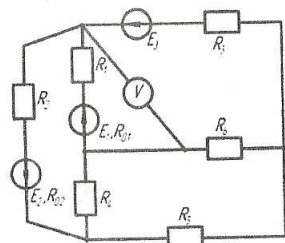
Puc. 1-30



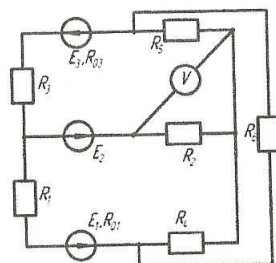
Puc. 1-31



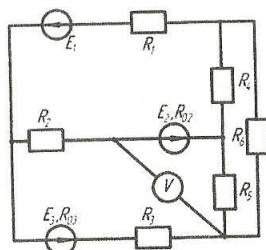
Puc. 1-33



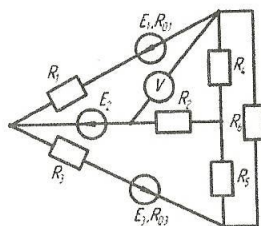
Puc. 1-35



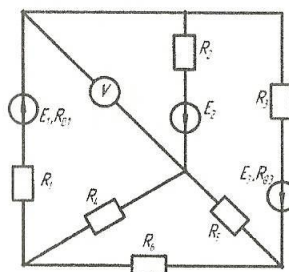
Puc. 1-32



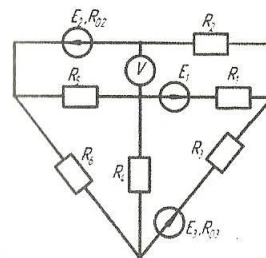
Puc. 1-34



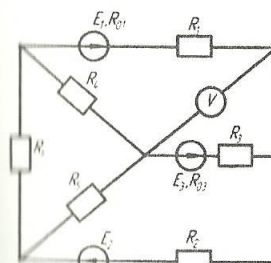
Puc. 1-36



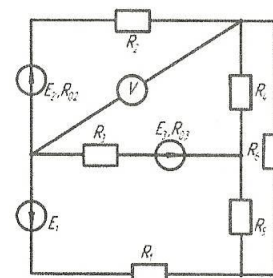
Puc. 1-37



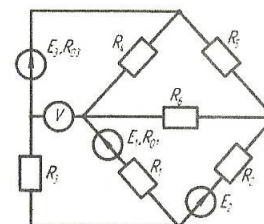
Puc. 1-39



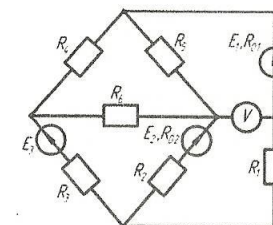
Puc. 1-41



Puc. 1-38



Puc. 1-40



Puc. 1-42

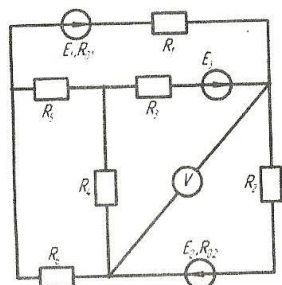


Рис. 1-43

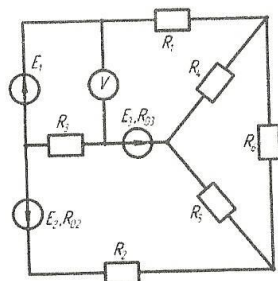


Рис. 1-44

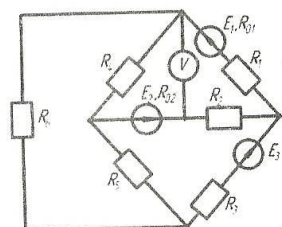


Рис. 1-45

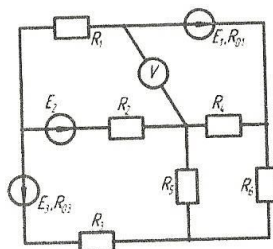


Рис. 1-46

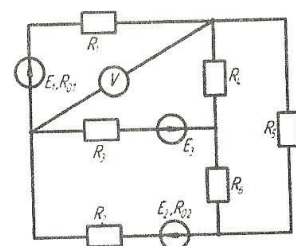


Рис. 1-47

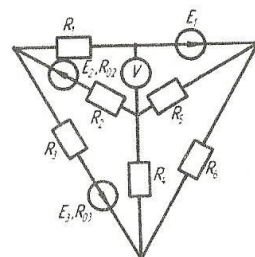


Рис. 1-48

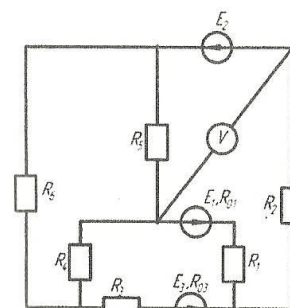


Рис. 1-49

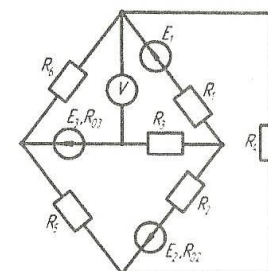


Рис. 1-50

Задача №2

Для электрической схемы, изображённой на рисунке 2-1 – 2-10:

1. По заданным в таблице 2 параметрам и э.д.с. источника определить токи во всех ветвях цепи и напряжения на отдельных элементах, используя символический метод расчёта.
2. Построить в масштабе на комплексной плоскости векторную диаграмму токов и напряжений.
3. Определить показания вольтметра и активную мощность, показываемую ваттметром.

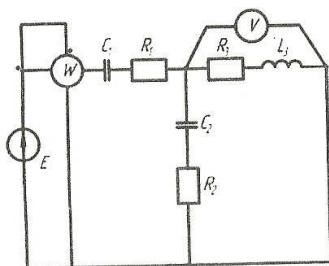


Рис. 2-1

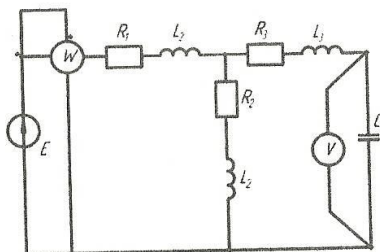


Рис. 2-2

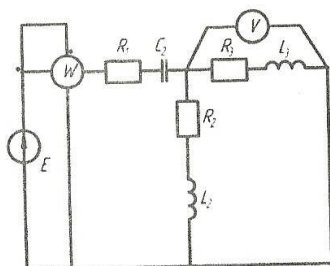


Рис. 2-3

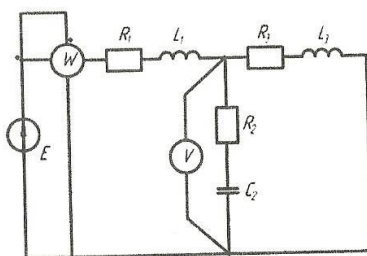


Рис. 2-4

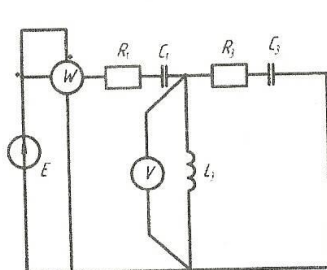


Рис. 2-5

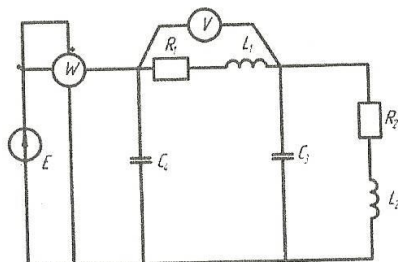


Рис. 2-6

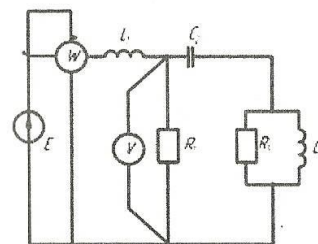


Рис. 2-7

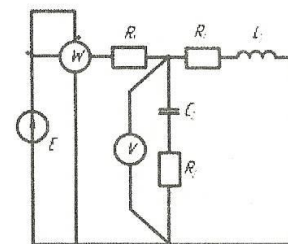


Рис. 2-8

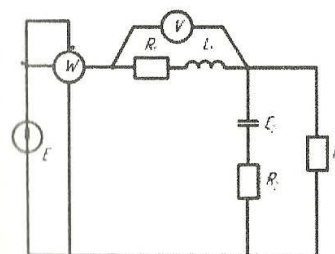


Рис. 2-9

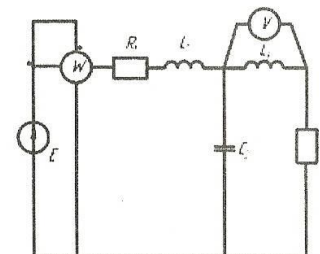
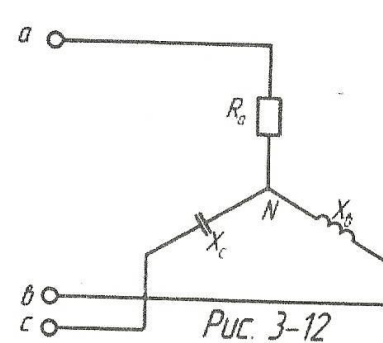
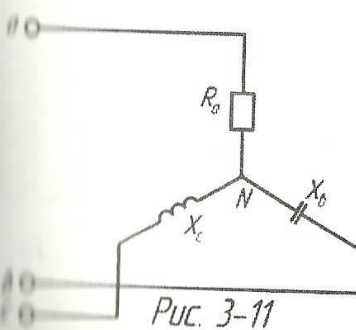
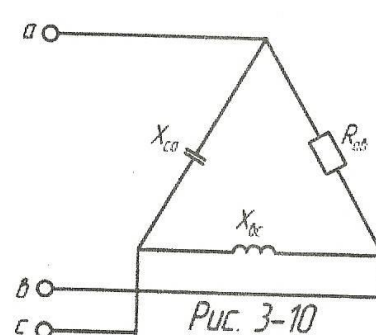
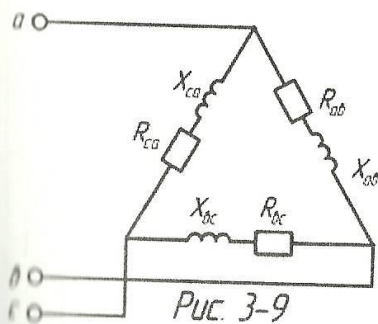
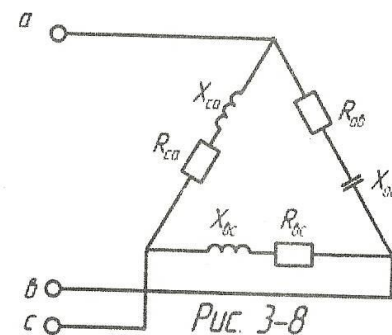
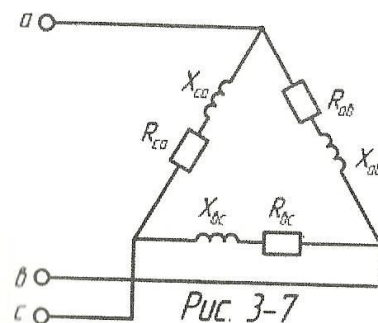
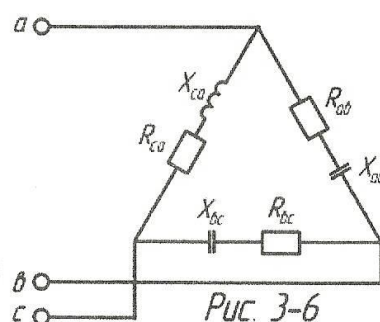
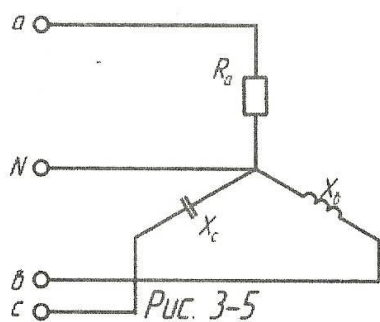
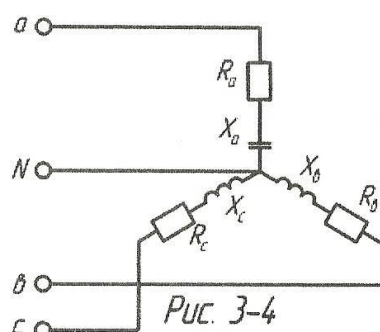
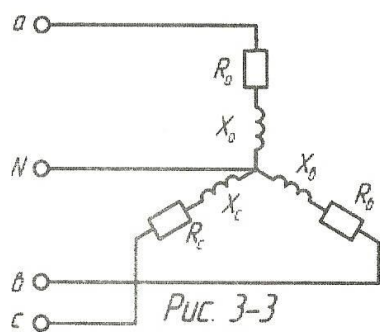
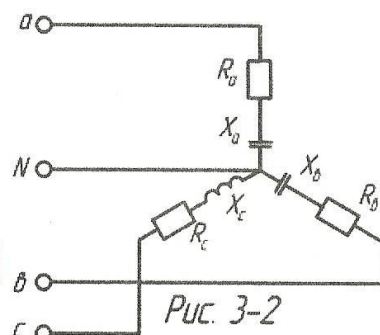
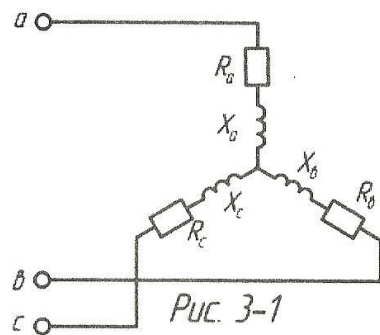


Рис. 2-10

Задача №3

Для электрической схемы, изображенной на рисунке 3-1 – 3-17:

1. По заданным в таблице 3 параметрам и линейному напряжению определить фазные и линейные токи, ток в нейтральном проводе (для четырехпроводной схемы).
2. Рассчитать активную мощность всей цепи и в каждой фазе отдельно.
3. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости.



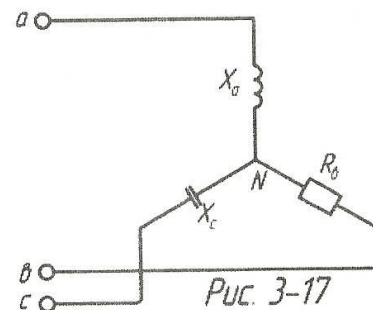
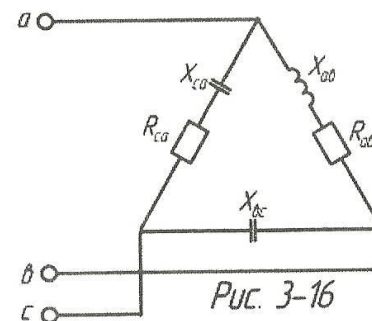
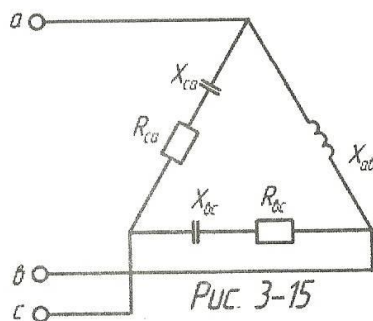
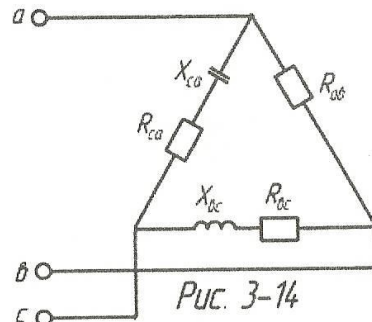
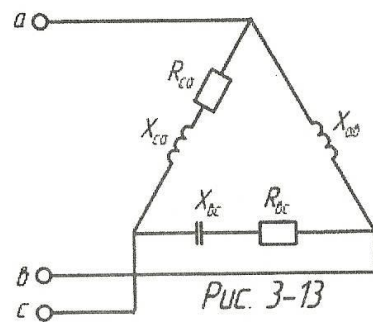


Таблица 1

пар.	Рис.	E1 В	E2 В	E3 В	R01 Ом	R02 Ом	R03 Ом	R1 Ом	R2 Ом	R3 Ом	R4 Ом	R5 Ом	R6 Ом
1	1-1	20	22	9	0,1	-	1,1	1	2	6	3	8	4
2	1-2	55	18	4	0,8	-	0,8	8	4	3	2	4	4
3	1-3	36	10	25	-	0,4	0,5	4	8	3	1	2	7
4	1-4	16	5	32	-	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
5	1-5	14	25	28	0,9	1,2	-	5	2	8	2	2	6
6	1-6	5	16	30	0,4	-	0,7	6	4	3	2	5	3
7	1-7	10	6	24	0,8	0,3	-	3,5	5	6	6	3	1
8	1-8	6	20	4	-	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
9	1-9	21	4	10	-	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1
10	1-10	4	9	18	0,8	-	0,7	2,7	10	4	8	10	2
11	1-11	4	24	6	0,9	-	0,5	9	8	1	6	10	4
12	1-12	16	8	9	0,2	0,6	-	2,5	6	6	5	10	5
13	1-13	48	12	6	0,8	1,4	-	4,2	4	2	12	6	2
14	1-14	12	36	12	-	0,4	1,2	3,5	5	1	5	6	9
15	1-15	12	6	40	1,2	0,6	-	2	3	8	5	7	8
16	1-16	8	6	36	1,3	-	1,2	3	2	1	6	8	6
17	1-17	72	12	4	0,7	1,5	-	6	1	10	4	12	4
18	1-18	12	48	6	-	0,4	0,4	2,5	1	4	15	2	2
19	1-19	12	30	9	0,5	-	0,5	3,5	2	3	3	1	3
20	1-20	9	6	27	-	1	0,8	4,5	2	8	13	4	3
21	1-21	15	63	6	1	-	1,2	5	3	1	2	12	3
22	1-22	54	27	3	1,2	0,9	-	8	3	1	4	2	2
23	1-23	36	9	24	-	0,8	0,8	3	4	2	1	5	1
24	1-24	3	66	9	-	0,7	1,2	1	4	2	2	7	3
25	1-25	12	30	25	1	0,4	-	1	5	1	1	6	4

Таблица 1 (продолжение)

вар.	Рис.	E1 В	E2 В	E3 В	R01 Ом	R02 Ом	R03 Ом	R1 Ом	R2 Ом	R3 Ом	R4 Ом	R5 Ом	R6 Ом
26	1-26	30	16	10	0,6	0,8	-	2	5	3	1	8	5
27	1-27	10	32	10	0,6	-	1	1,5	6	1	7	1	5
28	1-28	5	10	36	0,3	-	0,8	1,2	6	3	2	2	2
29	1-29	40	25	8	-	0,2	0,2	3	3	2	4	3	2
30	1-30	8	40	10	0,8	1	-	5	3	3	3	2	1
31	1-31	22	24	10	0,2	-	1,2	2	1	8	4	10	6
32	1-32	55	18	4	0,8	-	0,8	8	4	3	2	4	4
33	1-33	36	10	25	-	0,4	0,5	4	8	3	1	2	7
34	1-34	16	5	32	-	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
35	1-35	14	25	28	0,9	1,2	-	5	2	8	2	2	6
36	1-36	5	16	30	0,4	-	0,7	6	4	3	2	5	3
37	1-37	10	6	24	0,8	0,3	-	3,5	5	6	6	3	1
38	1-38	6	20	4	-	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
39	1-39	21	4	10	-	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1
40	1-40	4	9	18	0,8	-	0,7	2,7	10	4	8	10	2
41	1-41	4	24	6	0,9	-	0,5	9	8	1	6	10	4
42	1-42	16	8	9	0,2	0,6	-	2,5	6	6	5	10	5
43	1-43	48	12	6	0,8	1,4	-	4,2	4	2	12	6	2
44	1-44	12	36	12	-	0,4	1,2	3,5	5	1	5	6	9
45	1-45	12	6	40	1,2	0,6	-	2	3	8	5	7	8
46	1-46	8	6	36	1,3	-	1,2	3	2	1	6	8	6
47	1-47	72	12	4	0,7	1,5	-	6	1	10	4	12	4
48	1-48	12	48	6	-	0,4	0,4	2,5	1	4	15	2	2
49	1-49	12	30	9	0,5	-	0,5	3,5	2	3	3	1	3
50	1-50	9	6	27	-	1	0,8	4,5	2	8	13	4	3

Таблица 2

вар.	Рис.	E, В	f, Гц	C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ	C4, мкФ	L1, мГн	L2, мГн	L3, мГн	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом
1	2-1	150	50	637	300	-	-	-	-	15,9	2	3	4
2	2-1	100	50	637	300	-	-	-	-	15,9	8	3	4
3	2-1	120	50	637	300	-	-	-	-	15,9	8	3	4
4	2-1	200	50	637	300	-	-	-	-	15,9	8	3	4
5	2-2	100	50	-	-	100	-	15,9	1000	115	10	4	100
6	2-2	50	50	-	-	100	-	15,9	1000	115	10	4	100
7	2-2	120	50	-	-	100	-	15,9	1000	115	10	4	100
8	2-2	200	50	-	-	100	-	15,9	1000	115	10	4	100
9	2-2	220	50	-	-	100	-	15,9	1000	115	10	4	100
10	2-3	50	50	637	-	-	-	-	15,9	6,37	5	10	8
11	2-3	100	50	637	-	-	-	-	15,9	6,37	5	10	8
12	2-3	120	50	637	-	-	-	-	15,9	6,37	5	10	8
13	2-3	200	50	637	-	-	-	-	15,9	6,37	5	10	8
14	2-3	220	50	637	-	-	-	-	15,9	6,37	5	10	8
15	2-4	150	50	-	1600	-	-	31,8	-	95	10	2	10
16	2-4	100	50	-	1600	-	-	31,8	-	95	10	8	10
17	2-4	120	50	-	1600	-	-	31,8	-	95	10	8	10
18	2-4	200	50	-	1600	-	-	31,8	-	95	10	8	10
19	2-4	220	50	-	1600	-	-	31,8	-	95	10	8	10
20	2-5	50	50	637	159	-	-	-	-	95	15	10	-
21	2-5	100	50	637	159	-	-	-	-	95	15	10	-
22	2-5	120	50	637	159	-	-	-	-	95	15	10	-
23	2-5	200	50	637	159	-	-	-	-	95	15	10	-
24	2-5	220	50	637	159	-	-	-	-	95	15	10	-
25	2-6	150	50	-	-	637	159	25	9	-	6	4	-

Таблица 2 (продолжение)

вар.	Рис.	Е, В	f, Гц	C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ	C4, мкФ	L1, мГн	L2, мГн	L3, мГн	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом
26	2-6	100	50	-	-	637	159	25	9	-	6	4	-
27	2-6	100	50	-	-	637	159	25	9	-	6	4	-
28	2-6	200	50	-	-	637	159	25	9	-	6	4	-
29	2-6	220	50	-	-	637	159	25	9	-	6	4	-
30	2-7	50	50	-	637	-	-	19,1	-	31,8	40	-	40
31	2-7	100	50	-	637	-	-	19,1	-	31,8	40	-	10
32	2-7	120	50	-	637	-	-	19,1	-	31,8	40	-	10
33	2-7	200	50	-	637	-	-	19,1	-	31,8	10	-	40
34	2-7	220	50	-	637	-	-	15,9	-	31,8	40	-	10
35	2-8	50	50	-	318	-	-	15,9	-	-	8	10	4
36	2-8	100	50	-	318	-	-	15,9	-	-	8	10	4
37	2-8	150	50	-	318	-	-	15,9	-	-	8	10	4
38	2-8	200	50	-	318	-	-	15,9	-	-	8	10	4
39	2-8	220	50	-	318	-	-	15,9	-	-	8	10	4
40	2-9	50	50	-	318	-	-	9,55	-	-	4	40	40
41	2-9	100	50	-	318	-	-	9,55	-	-	4	40	4
42	2-9	120	50	-	318	-	-	9,55	-	-	4	40	4
43	2-9	200	50	-	318	-	-	9,55	-	-	40	10	40
44	2-9	220	50	-	318	-	-	9,55	-	-	40	10	40
45	2-10	50	50	-	159	-	-	15,9	-	31,8	35	20	-
46	2-10	100	50	-	159	-	-	15,9	-	31,8	35	20	-
47	2-10	120	50	-	159	-	-	15,9	-	31,8	35	20	-
48	2-10	200	50	-	159	-	-	15,9	-	31,8	35	20	-
49	2-10	220	50	-	159	-	-	15,9	-	31,8	35	20	-
50	2-10	50	50	-	318	-	-	15,9	-	31,8	5	10	-

Таблица 3

Вар.	Рис.	Ул В	Ra Ом	Rв Ом	Rc Ом	Xa Ом	Xв Ом	Xc Ом	Rав Ом	Rвс Ом	Rca Ом	Xав Ом	Xвс Ом	Xca Ом
1	3-1	220	8	8	8	6	6	6	-	-	-	-	-	-
2	3-1	380	8	8	8	6	6	6	-	-	-	-	-	-
3	3-2	127	3	4	6	4	3	8	-	-	-	-	-	-
4	3-2	220	8	4	6	4	3	8	-	-	-	-	-	-
5	3-2	380	8	4	6	4	3	8	-	-	-	-	-	-
6	3-3	127	4	8	6	3	4	8	-	-	-	-	-	-
7	3-3	220	4	8	6	3	4	9	-	-	-	-	-	-
8	3-3	380	4	3	6	8	4	8	-	-	-	-	-	-
9	3-4	127	16,8	8	8	14,2	6	4	-	-	-	-	-	-
10	3-4	220	16,8	8	8	14,2	6	4	-	-	-	-	-	-
11	3-4	380	16,8	8	8	8	6	4	-	-	-	-	-	-
12	3-5	127	10	-	-	-	10	10	-	-	-	-	-	-
13	3-5	220	10	-	-	-	10	10	-	-	-	-	-	-
14	3-5	380	10	-	-	-	10	10	-	-	-	-	-	-
15	3-6	127	-	-	-	-	-	-	8	8	8	6	6	6
16	3-6	220	-	-	-	-	-	-	8	8	8	6	6	6
17	3-6	380	-	-	-	-	-	-	8	8	8	6	6	6
18	3-7	127	-	-	-	-	-	-	8	4	6	4	3	8
19	3-7	220	-	-	-	-	-	-	8	4	6	4	3	8
20	3-7	380	-	-	-	-	-	-	8	4	6	4	3	8
21	3-8	127	-	-	-	-	-	-	4	8	6	3	4	8
22	3-8	220	-	-	-	-	-	-	4	8	6	3	4	8
23	3-8	380	-	-	-	-	-	-	4	8	6	3	4	8
24	3-9	127	-	-	-	-	-	-	16,8	8	3	14,2	6	4
25	3-9	220	-	-	-	-	-	-	16,8	8	3	14,2	6	4

Таблица 3 (продолжение)

Вар.	Рис.	Ул В	Ra Ом	Rb Ом	Rc Ом	Xa Ом	Xb Ом	Xc Ом	Rav Ом	Rbc Ом	Rca Ом	Xav Ом	Xbc Ом	Xca Ом
26	3-9	380	-	-	-	-	-	-	16,8	8	8	14,2	6	4
27	3-10	127	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	10	10
28	3-10	220	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	10	10
29	3-10	380	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	10	10
30	3-11	127	10	-	-	-	10	10	-	-	-	-	-	-
31	3-11	220	10	-	-	-	10	10	-	-	-	-	-	-
32	3-11	380	10	-	-	-	10	10	-	-	-	-	-	-
33	3-12	127	15	-	-	-	5	5	-	-	-	-	-	-
34	3-12	220	15	-	-	-	5	5	-	-	-	-	-	-
35	3-12	380	15	-	-	-	5	5	-	-	-	-	-	-
36	3-13	127	-	-	-	-	-	-	-	3	8	4	6	8
37	3-13	220	-	-	-	-	-	-	-	3	8	4	6	8
38	3-13	380	-	-	-	-	-	-	-	3	8	4	6	8
39	3-14	127	-	-	-	-	-	-	8	4	8	-	6	10
40	3-14	220	-	-	-	-	-	-	8	4	8	-	6	10
41	3-14	380	-	-	-	-	-	-	8	4	8	-	6	10
42	3-15	127	-	-	-	-	-	-	5	6	5	8	4	4
43	3-15	220	-	-	-	-	-	-	5	6	5	8	4	4
44	3-15	380	-	-	-	-	-	-	5	6	5	3	4	4
45	3-16	127	-	-	-	-	-	-	5	-	6	10	8	4
46	3-16	220	-	-	-	-	-	-	5	-	6	10	8	4
47	3-16	380	-	-	-	-	-	-	5	-	6	10	8	4
48	3-17	127	-	3	-	15	-	10	-	-	-	-	-	-
49	3-17	220	-	3	-	15	-	10	-	-	-	-	-	-
50	3-17	380	-	3	-	15	-	10	-	-	-	-	-	-

Рекомендуемая литература

1. В.Г Герасимов. Электротехника и электроника. Книга I. Электрические и магнитные цепи. Москва, Энергоатомиздат, 1996, 287 с.
2. А.С. Касаткин, М.В. Немцов. Электротехника. Москва, Энергоатомиздат, 2006, 518 с.
3. Б.И. Петленко, Р.В. Меркулов и др. Электротехника и электроника. Москва, Издательский центр "Академия", 2003, 320 с.
4. В.С.Пантюшин. Сборник задач по электротехнике и основам электроники. Москва, высшая школа, 1979, 278с.

Содержание	Стр.
Программа	3
Электрические цепи постоянного тока	19
Электрические цепи переменного тока. Однофазные цепи	30
Трёхфазные цепи	41
Задание	50
Таблицы с вариантами заданий	64
Список рекомендуемой литературы	70

Олег Васильевич Девочкин
 Александр Августинovich Кецарис
 Валентина Николаевна Полякова
 «Электротехника»
 Часть I. Электрические цепи.
 Методическое пособие к выполнению расчетно-
 графических и контрольных работ для студентов
 высших учебных заведений неэлектротехнических
 специальностей.

Усл. п. л. 4
 Тираж 100

Уч. - изд. 1.

МАМИ, Москва 105839, Б. Семёновская, 38