



Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению контрольных заданий
по электротехническим дисциплинам

для студентов дневной и заочной форм обучения
направлений

6.0902 - Инженерная механика,
6.0915 - Компьютерная инженерия,
6.0909 - Приборы,
6.0708 - Экология

Севастополь
2006

Методические указания к выполнению контрольных заданий по электротехническим дисциплинам для студентов дневной и заочной форм обучения направлений 6.0902 - Инженерная механика, 6.0915 - Компьютерная инженерия, 6.0909 - Приборы, 6.0708 - Экология /Разраб. Е.Б. Башук, Г.Ф.Косова, В.Н.Мирянова.- Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. -70 с.

Цель данного издания: помочь студентам заочной и дневной форм обучения в самостоятельном изучении электротехнических дисциплин, а также в выполнении расчётно-графических заданий и контрольных работ.

Указания содержат индивидуальные задания для самостоятельного выполнения, примеры расчётов электрических цепей и устройств, темы рефератов, вопросы для подготовки к экзаменам и зачётам.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры СПЭМС (протокол № 11 от «4» июля 2006г.)

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент: Олейников А.М., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Судовых и промышленных электромеханических систем.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИН.....	4
2. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ.....	9
3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ПО РАЗДЕЛАМ ДИСЦИПЛИНЫ.....	9
3.1. Электрические цепи постоянного тока.....	9
3.2. Электрические цепи однофазного синусоидального тока.....	10
3.3. Трехфазные электрические цепи.....	13
3.4. Переходные процессы в линейных электрических цепях.....	14
3.5. Трансформаторы.....	15
3.6. Электрические машины.....	16
3.7. Цифровые комбинационные устройства.....	19
3.8. Цифровые устройства с памятью.....	20
3.9. Устройства преобразования электрических сигналов.....	20
3.10. Генераторы импульсов.....	23
4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И УСТРОЙСТВ.....	24
5. ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ.....	62
6. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНАМ И ЗАЧЕТАМ.....	64
7. ПРИМЕРЫ ЗАДАЧ ДЛЯ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ БИЛЕТОВ.....	68
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	69

ВВЕДЕНИЕ

Методическое пособие предназначено для студентов изучающих дисциплины электротехнического профиля направлений подготовки: 6.0902-Инженерная механика, 6.0915-Компьютерная инженерия, 6.0909-Приборы 6.0708-Экология.

В состав пособия входит обобщенная программа, контрольные задания, примеры решения некоторых задач, набор контрольных вопросов

для подготовки к экзамену и зачету.

Пособие рассчитано на студентов как дневной, так и заочной формы обучения.

1. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИН

1.1. Электрические и магнитные цепи

Линейные электрические цепи постоянного тока. Электрические устройства постоянного тока и области их применения. Условные графические обозначения электротехнических устройств постоянного тока. Элементы электрических цепей. Источники и приемники электрической энергии. Схемы замещения электротехнических устройств постоянного тока. Режимы работы активных двухполюсников. Топологические понятия теории электрических цепей. Методы расчета электрических цепей: на основе использования законов Кирхгофа, контурных токов, узловых потенциалов, эквивалентного генератора, наложения. Энергетические соотношения в электрических цепях. Определение параметров двухэлементных схем замещения пассивных и активных двухполюсников. Основные свойства и области применения мостовых цепей, потенциометров, делителей напряжения и тока.

Линейные электрические цепи переменного тока. Электротехнические устройства и электрические цепи переменного тока. Особенности электромагнитных процессов в электрических цепях переменного тока. Причины широкого распространения электротехнических устройств синусоидального тока промышленной частоты. Способы представления электрических величин - синусоидальных функций: временными диаграммами, векторами, комплексными числами. Основные параметры, характеризующие синусоидальные электрические дисциплины.

Однофазные цепи. Источник синусоидальной ЭДС. Приемники электрической энергии. Резисторы, индуктивные катушки, конденсаторы. Условные графические обозначения электротехнических устройств переменного тока. Схемы замещения электрических цепей переменного тока. Уравнения, связывающие синусоидальный ток и напряжение в резисторе, конденсаторе, катушке индуктивности. Уравнения законов Кирхгофа для цепей с последовательным и параллельным соединением элементов в комплексной и временной форме записи. Активное, реактивное и полное сопротивление двухполюсника. Векторные диаграммы на комплексной плоскости. Фазовые соотношения между токами и напряжениями.

Резонансные явления, резонанс токов, резонанс напряжений, условия возникновения и практическое значение. Понятие об анализе разветвленных цепей с одним источником питания синусоидальной формы. колеба-

ния энергии и мощности в цепях синусоидального тока. Активная, реактивная и полная мощности. Единицы их измерения. Коэффициент мощности. Техничко-экономическое значение повышения коэффициента мощности и способы компенсации реактивной мощности.

Трехфазные цепи. Исторические предпосылки возникновения трехфазных цепей. Элементы трехфазных цепей. Принцип действия трехфазного генератора. Способы изображения симметричной системы ЭДС. Способы соединения фаз трехфазного источника питания. Трехпроводная и четырехпроводная цепи. Фазные и линейные токи и напряжения. Симметричные режимы трехфазной цепи. Соединения элементов трехфазной цепи звездой и треугольником. Соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами при симметричных нагрузках и несимметричных нагрузках. Мощность трехфазной цепи. Коэффициент мощности симметричных трехфазных приемников и способы его повышения.

Четырехполюсники. Практическое применение теории четырехполюсников. Основные уравнения и схемы замещения четырехполюсников. Способы соединения четырехполюсников. Обратная связь и ее использование в схемах электроники.

Переходные процессы. Причины возникновения переходных процессов в электрических цепях. Классический метод расчета переходных процессов. Дифференциальные уравнения для линейных цепей и методы их решения. Установившиеся и свободные составляющие электрических токов и напряжений. Законы коммутации и их использование для определения начальных условий переходных процессов. Влияние параметров цепи на длительность переходного процесса. Постоянная времени. Описание процесса заряда и разряда конденсатора, включенного последовательно с резистором. Описание переходного процесса в цепи, содержащей индуктивную катушку и резистор, включенный на постоянное напряжение. Описание переходных процессов при включении цепи, содержащей резистор, конденсатор и индуктивную катушку, на постоянное и синусоидальное напряжение.

Операторный метод анализа переходных процессов в линейных электрических цепях.

Периодические несинусоидальные напряжения и токи в электрических цепях. Причины возникновения периодических несинусоидальных э.д.с., токов и напряжений.

Представление периодических несинусоидальных э.д.с., напряжений и токов рядами Фурье. Максимальное, действующее и среднее значения периодической несинусоидальной величины. Частотный спектр периодической несинусоидальной величины. Коэффициент амплитуды, формы и искажения. Понятие об электрических фильтрах, их схемы, принципы

работы и частотные характеристики. Понятие об избирательных, дифференцирующих и интегрирующих цепях.

Цепи с взаимной индукцией. Э.д.с. самоиндукции и взаимной индукции. Согласное и встречное включение катушек. Воздушный трансформатор. Принцип работы и область применения.

Нелинейные электрические цепи. Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов. Управляемые и неуправляемые нелинейные элементы. Анализ нелинейных цепей постоянного тока. Нелинейные цепи переменного тока. Нелинейные цепи при одновременном воздействии источников постоянного и переменного напряжений.

Магнитные цепи. Магнитные цепи постоянного тока. Анализ неразветвленных и разветвленных магнитных цепей. Магнитные цепи переменных магнитных потоков. Особенности электромагнитных процессов в катушке с магнитопроводом. Магнитные потери энергии. График мгновенных значений магнитного потока и тока при синусоидальном напряжении. Эквивалентный синусоидальный ток. Анализ электромагнитного состояния катушки с магнитопроводом. Уравнение электрического состояния, вольт-амперная характеристика, векторная диаграмма, схема замещения катушки.

1.2. Электрические измерения

Электрические измерения и приборы. Расширение понятия измерительного процесса. Сочетание измерений с функциями автоматического контроля, сигнализации и управления. Преимущество электрических методов измерения неэлектрических величин. Понятие об электрическом преобразователе. Измерительные приборы непосредственного отсчета, приборы сравнения, аналоговые и цифровые приборы. Устройство, принцип действия, основные свойства и области применения приборов магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и выпрямительной систем. Особенности электронных измерительных приборов. Измерения токов, напряжений, сопротивлений, мощности и энергии.

1.3. Электромагнитные устройства и электрические машины

Электромагнитные устройства переменного тока: дроссели, контакторы, магнитные пускатели, реле и т.д. Их принцип действия, характеристики и области применения.

Назначение и области применения трансформаторов. Назначение и области применения трансформаторов. Устройство, принцип действия однофазного трансформатора с магнитопроводом. Уравнения электрического и магнитного состояния, векторная диаграмма трансформатора,

схема замещения. Изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке и его внешние характеристики. Потери энергии в трансформаторе. Коэффициент полезного действия трансформатора. Паспортные данные трансформаторов. Расчет токов короткого замыкания. Трехфазные трансформаторы. Многообмоточные трансформаторы. Автотрансформаторы. Измерительные трансформаторы. Импульсные трансформаторы.

Машины постоянного тока. Устройство и принцип действия, режимы генератора и двигателя. Уравнения электрического состояния и схема замещения обмотки якоря. Энергетическая диаграмма. Двигатели постоянного тока. Способы возбуждения. Пуск двигателя. Свойство саморегулирования. Механические и рабочие характеристики. Регулирование частоты вращения. Паспортные данные двигателей постоянного тока.

Асинхронные машины. Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя. Уравнения электрического состояния цепей обмоток статора и ротора. Свойство саморегулирования вращающего момента. Магнитное поле машины. Электромагнитный момент. Механические и рабочие характеристики. Энергетические диаграммы. Паспортные данные. Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором. Регулирование частоты вращения.

Синхронные машины. Устройство, принцип действия, области применения и эксплуатационные особенности. Пуск синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением. Потери, к.п.д. и электромагнитный момент синхронного двигателя. Разновидности синхронных двигателей.

Электрические микромашины. Классификация электрических микромашин, их применение в приборостроении и станкостроении. Тахогенераторы: принцип действия, устройство и применение. Исполнительные микродвигатели. Способы управления. Механические и регулировочные характеристики. Синхронные шаговые и линейные двигатели. Принцип действия. Области применения исполнительных микродвигателей. Сельсины, их конструкция, принцип действия и применение; индикаторный и трансформаторный режимы работы. Конструкция и основные характеристики вращающихся трансформаторов. Область применения. Бесконтактные микродвигатели. Новые тенденции в области создания микромашин.

1.4. Основы электроники и микропроцессорной техники

Элементная база. Характеристики, параметры, назначение полупроводниковых резисторов, диодов, тиристоров, биполярных и полевых транзисторов приборов. Интегральных микросхем и устройств современной электроники.

Выпрямители. Электрические схемы и принцип работы выпрямителей. Внешние характеристики выпрямителей. Электрические фильтры. Умножители напряжения. Стабилизаторы напряжения и тока. Назначение, принцип действия, область применения преобразователей напряжения. Инверторы, конверторы.

Усилители. Анализ работы усилителей. Коэффициенты усиления, амплитудно-частотные характеристики. Режимы работы и температурная стабилизация. Схемы, свойства и применение операционных усилителей (ОУ). Дифференцирующие усилители, сумматоры и интеграторы на базе ОУ.

Импульсные и цифровые устройства. Общая характеристика импульсных устройств. Параметры импульсных сигналов. Электронные ключи и простейшие формирователи импульсных сигналов. Логические элементы. Основные параметры логических элементов различных типов. Интегральные микросхемы логических устройств. Триггеры. Определение, классификация, способы запуска триггера, области применения. Принцип работы, временные диаграммы. Цифровые счетчики импульсов. Дешифраторы, регистры, мультиплексоры. Компараторы и триггеры Шмитта. Мультивибраторы. Определение, классификация принцип действия область применения. Генераторы линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН). Определение, классификация, области применения ГЛИН. Описание работы, временные диаграммы.

Мини-ЭВМ, микропроцессоры (МП). Общие характеристики МП. Области применения МП и микро-ЭВМ. Основные технические характеристики МП. Современное состояние и перспективы микропроцессорного управления. Понятие об архитектуре МП. Основные показатели архитектуры МП. Аппаратное обеспечение. Виды запоминающих устройств. Назначение и использование регистров в МП. Шины передачи данных, шинная структура. Периферийное оборудование: клавишный пульт, дисплей, печатающее устройство, интерфейсы. Программное обеспечение и его терминология. Системы счисления и коды. Сравнение способов программирования, базирующихся на различных языках. Основные процессы в МП: обработка информации, управление, организация шин и интерфейса, порты ввода-вывода, координация взаимодействия МП с внешними устройствами, передача данных с помощью прерываний, прямой доступ к памяти и организация связи МП с памятью. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Краткие технические характеристики отечественных и зарубежных МП, однокристальные и комплектные МП.

Практическое применение МП. Информационно-измерительные системы. Системы управления технологическими процессами. Структурные и функциональные схемы систем гибких автоматизированных произ-

водств, промышленных роботов, манипуляторов.

Заключение. Роль электротехнических и электронных устройств в современной технике и перспективы развития.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

Количество задач, входящих в каждую контрольную работу или расчетно-графическое задание, определяется преподавателем в зависимости от направления обучения и объема конкретной дисциплины.

Каждая контрольная работа выполняется отдельно с соблюдением требований ЕСКД, с полями для замечаний рецензента. В конце работы должен быть приведен полный список использованной литературы.

Выбор варианта задания проводится в соответствии с указаниями, приведенными в тексте каждой задачи.

При выполнении заданий можно воспользоваться современными программными средствами анализа электротехнических и электронных устройств. Методические указания содержат примеры расчета всех задач предлагаемых заданий (раздел 4). Рекомендуется предварительно ознакомиться с данным разделом.

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ПО РАЗДЕЛАМ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Электрические цепи постоянного тока

ЗАДАЧА 3.1. Для заданной электрической цепи выполнить следующее:

1. Составить систему уравнений, необходимых для определения токов по первому и второму законам Кирхгофа для схемы. При проведении расчетов из схемы удалить измерительные приборы – вольтметр и ваттметр;
2. Найти все токи, пользуясь методом контурных токов;
3. Проверить правильность решения, применив метод узлового напряжения. Предварительно упростить схему, заменив треугольник сопротивлений R_4 , R_5 и R_6 эквивалентной звездой. Начертить расчетную схему с эквивалентной звездой и показать на ней токи;
4. Определить ток в резисторе R_6 методом эквивалентного генератора;
5. Определить показание вольтметра и составить баланс мощностей для заданной схемы;
6. Построить в масштабе потенциальную диаграмму для внешнего контура.

Вариант задания выбирается по предпоследней и последней цифре номера индивидуального плана (зачетной книжки) по таблице 3.1: первая запись в клеточке таблицы означает номер рисунка, вторая - номер числовых данных из таблицы 3.2. Схема электрической цепи указана на рисунках 3.1, 3.2, 3.3.

Таблица 3.1 - Данные вариантов

Последняя цифра номера										
Предпоследняя цифра номера	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1;4;7	3.1;1	3.1;2	3.1;3	3.1;4	3.1;5	3.1;6	3.1;7	3.1;8	3.1;9	3.1;0
2;5;8	3.2;1	3.2;2	3.2;3	3.2;4	3.2;5	3.2;6	3.2;7	3.2;8	3.2;9	3.2;0
3;6;9;0	3.3;1	3.3;2	3.3;3	3.3;4	3.3;5	3.3;6	3.3;7	3.3;8	3.3;9	3.3;0

Таблица 3.2 - Числовые данные

Вариант	E1, В	E2, В	E3, В	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом	R5, Ом	R6, Ом
1	9	6	27	4,5	2	8	13	4	3
2	15	63	6	5,0	3	1	2	12	3
3	54	27	3	8,0	3	1	4	2	2
4	36	9	24	3,0	4	2	1	5	1
5	3	66	9	1,0	4	2	2	7	3
6	12	30	25	1,0	5	1	1	6	4
7	30	16	10	2,0	5	3	1	8	5
8	10	32	10	1,5	6	1	7	1	5
9	5	10	36	1,2	6	3	2	2	2
0	40	25	8	3,0	3	2	4	3	2

3.2. Электрические цепи однофазного синусоидального тока

ЗАДАЧА 3.2. Дана электрическая цепь с известными параметрами элементов и э.д.с. источника, частотой $f = 50$ Гц.

1. Определить токи во всех ветвях цепи и напряжения на отдельных участках.

2. Составить баланс активной и реактивной мощностей.
3. Построить в масштабе на комплексной плоскости векторную диаграмму токов и потенциальную диаграмму напряжений по внешнему контуру.
4. Определить показание вольтметра и активную мощность, измеряемую ваттметром.

Вариант выполняемого задания выбирается по таблице 3.3 в соответствии с последней и предпоследней цифрами номера индивидуального плана(зачетной книжки): первая запись в ячейке таблицы означает номер рисунка, вторая - номер числовых данных из таблицы 3.4.

Таблица 3.3 - Данные вариантов

Предпоследняя цифра номера	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1;4;7	3.4;1	3.4;2	3.4;3	3.4;4	3.4;5	3.4;6	3.4;7	3.4;8	3.4;9	3.4;0
2;5;8	3.5;1	3.5;2	3.5;3	3.5;4	3.5;5	3.5;6	3.5;7	3.5;8	3.5;9	3.5;0
3;6;9;0	3.6;1	3.6;2	3.6;3	3.6;4	3.6;5	3.6;6	3.6;7	3.6;8	3.6;9	3.6;0

Таблица 3.4 - Числовые данные

Вариант	E, В	f, Гц	C ₁ , мкФ	C ₂ , мкФ	C ₃ , мкФ	L ₁ , мГн	L ₂ , мГн	L ₃ , мГн	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом
1	200	50	637	300	200	32	31,8	70	10	8	10
2	220	50	400	1600	100	31,8	32	95	10	8	20
3	50	50	500	159	100	31,8	30	95	15	10	10
4	100	50	500	159	200	15,9	31	80	15	10	10
5	120	50	400	159	200	15,9	32	80	10	10	20
6	200	50	637	159	200	16	31,8	95	15	10	20
7	220	50	637	159	500	20	20	95	5	10	20
8	150	50	500	159	500	25	10	95	6	10	20
9	100	50	637	159	637	20	10	95	6	5	20
0	100	50	400	159	500	25	10	95	6	4	10

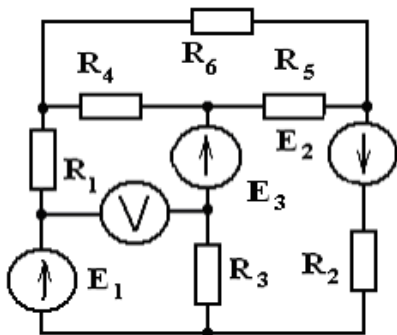


Рисунок 3.1

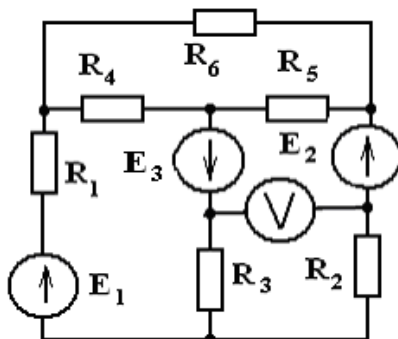


Рисунок 3.2

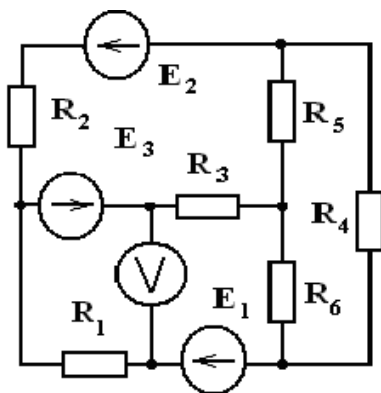


Рисунок 3.3

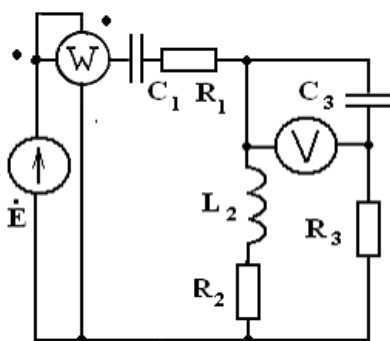


Рисунок 3.4

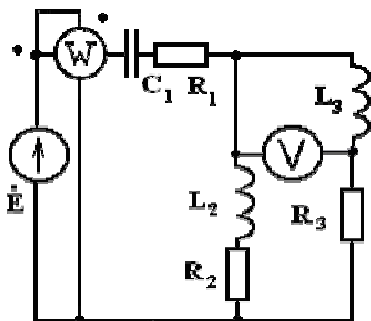


Рисунок 3.5

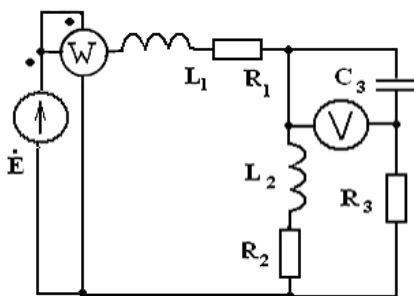


Рисунок 3.6

3.3. Трехфазные электрические цепи

ЗАДАЧА 3.3. Для электрической цепи, схема которой изображена на рисунках 3.7-3.10 по заданным в таблице 3.5 параметрам, определить:

1. Фазные и линейные токи, ток в нейтральном проводе (для четырехпроводной схемы).
2. Активную мощность всей цепи и каждой фазы отдельно.
3. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости.

Номер варианта выбирается по последней цифре индивидуального плана (зачетной книжки).

Таблица 3.5 - Числовые данные

Вариант	Рисунок	Uф, В	Ra, Ом	Rb, Ом	Rc, Ом	Xa, Ом	Xb, Ом	Xc, Ом	Rab Ом	Rbc, Ом	Rca, Ом	Xab Ом	Xbc, Ом	Xca, Ом
1	3.7	127	4	8	6	3	4	8	-	-	-	-	-	-
2	3.8	127	16	8	8	14	6	4	-	-	-	-	-	-
3	3.9	127	-	-	-	-	-	-	10	10	10	8	6	4
4	3.10	127	-	-	-	-	-	-	8	6	4	6	6	6
5	3.7	127	8	4	16	4	3	8	-	-	-	-	-	-
6	3.8	220	14	8	6	3	4	8	-	-	-	-	-	-
7	3.9	220	-	-	-	-	-	-	4	8	6	3	4	8
8	3.10	220	-	-	-	-	-	-	8	8	8	6	3	4
9	3.7	220	9	4	5	4	6	5	-	-	-	-	-	-
0	3.8	380	10	12	8	20	10	10	-	-	-	-	-	-

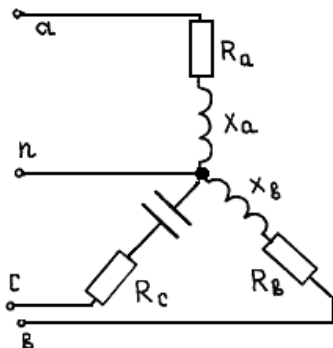


Рисунок 3.7

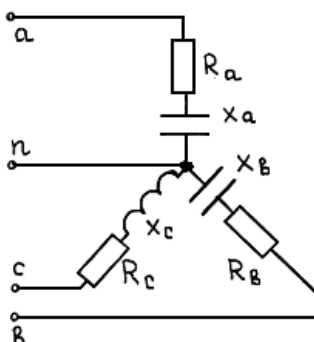


Рисунок 3.8

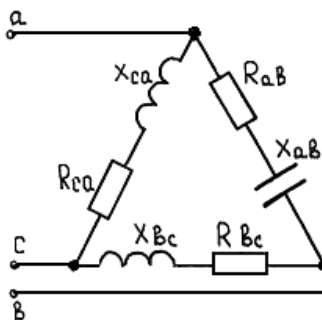


Рисунок 3.9

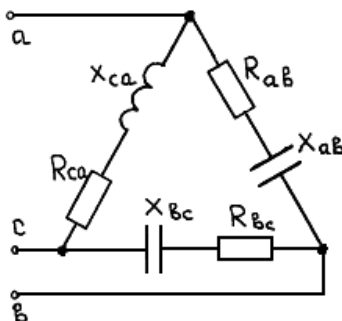


Рисунок 3.10

3.4. Переходные процессы в линейных электрических цепях

ЗАДАЧА 3.4.1. Найти ток переходного процесса при подключении индуктивной катушки с параметрами R , L к источнику постоянного напряжения U_0 и источнику синусоидального напряжения, частотой $f = 50$ Гц.

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi), \text{ В.}$$

Изобразить схему цепи. Вариант задания выбирается по таблице 3.6. в соответствии с последней цифрой индивидуального плана (зачетной книжки).

Таблица 3.6 - Числовые данные

Вариант	R, Ом	L, Гн	U ₀ , В	U _m , В	φ, град	C, мкФ
1	20	0,3	50	60	30	100
2	8	0,23	60	70	45	150
3	6	0,14	70	80	60	160
4	7	0,13	80	90	30	140
5	9	0,05	90	100	45	250
6	15	0,15	110	90	60	300
7	7	0,21	90	120	30	220
8	8	0,12	80	90	45	150
9	12	0,25	70	110	60	170
0	8	0,28	120	100	45	180

ЗАДАЧА 3.4.2. Найти ток переходного процесса в цепи с последовательным соединением резистора R и конденсатора C при подключении ее к источнику постоянного напряжения U₀ и к источнику синусоидального напряжения частотой f = 50 Гц.

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi), \text{ В.}$$

Изобразить схему цепи. Вариант задания выбирается по таблице 3.6. в соответствии с последней цифрой индивидуального плана (зачетной книжки).

3.5. Трансформаторы

ЗАДАЧА 3.5. Для трехфазного трансформатора, параметры которого приведены в таблице 3.7, определить коэффициент мощности холостого хода $\cos \varphi_0$, сопротивления первичной и вторичной обмоток R_1 , X_{d1} , R_2 и X_{d2} , расчетные сопротивления Z_0 , R_0 и X_0 , угол магнитных потерь δ . Построить векторную диаграмму

трансформатора для нагрузки $\beta=0,8$ и $\cos \varphi_2=0,75$. Построить внешнюю характеристику $U_2=f_1(\beta)$ и зависимость к.п.д. от нагрузки $\eta=f_2(\beta)$ для $\cos \varphi_2=0,75$. Начертить Т-образную схему замещения трансформатора. Вариант задания выбирается по таблице 3.7. в соответствии с последней цифрой индивидуального плана (зачетной книжки).

Таблица 3.7 - Числовые данные

Вариант	Группа соединения	$S_{ном},$ кВА	$U_{1ном},$ кВ	$U_{20},$ В	$U_K,$ %	$P_K,$ Вт	$P_0,$ Вт	$I_0,$ %
1	Y/ Δ -11	100	35	230	4,7	2270	465	2,6
2	Y/Y-11	100	35	400	4,7	2270	465	2,6
3	Δ /Y -11	160	6	230	4,5	2650	540	2,4
4	Δ / Δ -11	160	6	400	4,5	2650	540	2,4
5	Y/ Δ -0	160	10	230	4,5	3100	540	2,4
6	Y/Y-0	160	10	400	4,5	3100	540	2,4
7	Δ /Y -0	160	6	690	4,5	2650	540	2,4
8	Δ / Δ -0	250	6	230	4,5	3700	780	2,3
9	Y/ Δ -0	250	6	400	4,5	3700	780	2,3
0	Y/Y-0	250	10	230	4,7	4200	780	2,3

3.6. Электрические машины

ЗАДАЧА 3.6.1. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, номинальная мощность которого $P_{ном}$, включен в сеть на номинальное напряжение $U_{ном}$ частотой $f=50$ Гц.

1. Определить номинальный $I_{ном}$ и пусковой $I_{пуск}$ ток, номинальный $M_{ном}$, пусковой $M_{пуск}$ и максимальный $M_{мах}$ моменты.

2. Вычислить полные потери в двигателе при номинальной нагрузке $P_{ном}$.

3. Как изменится пусковой момент двигателя при снижении напряжения на его зажимах на 15% и возможен ли пуск двигателя при этих условиях с номинальной нагрузкой?

4. Построить механическую характеристику двигателя $n=f(M)$.

Вариант задания выбирается по таблице 3.8 в соответствии с последней цифрой индивидуального плана (зачетной книжки).

Таблица 3.8 - Числовые данные

Вариант	$U_{ном}, В$	$P_{ном}, кВт$	$S_{ном}, \%$	$\eta_{ном}$	$\cos\varphi_{ном}$	р, число пар полюсов	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$
1	220	10	4,0	0,88	0,89	1	2,2	1,5	7,0
2	220	13	3,5	0,88	0,89	1	2,2	1,5	7,0
3	220	17	3,5	0,88	0,90	1	2,2	1,2	7,0
4	220	22	3,5	0,88	0,90	1	2,2	1,1	7,0
5	220	30	3,0	0,89	0,90	1	2,2	1,1	7,0
6	220	40	3,0	0,89	0,91	1	2,2	1,0	7,0
7	220	55	3,0	0,90	0,92	1	2,2	1,0	7,0
8	220	75	3,0	0,90	0,92	1	2,2	1,0	7,0
9	220	100	2,5	0,915	0,92	1	2,2	1,0	7,0
0	380	10	3,0	0,885	0,87	2	2,0	1,4	7,0

ЗАДАЧА 3.6.2. Двигатель параллельного возбуждения, номинальное напряжение которого $U_{ном}$, при номинальной нагрузке потребляет ток $I_{ном}$, а при холостом ходе - I_0 . Номинальная частота вращения $n_{ном}$, сопротивление обмотки якоря $R_{я}$, сопротивление цепи возбуждения R_B . Магнитные и механические потери принять постоянными при всех режимах работы двигателя. Определить:

1. Номинальную мощность двигателя $P_{ном}$ на валу.
2. Номинальный вращающий момент $M_{ном}$, номинальный к.п.д. $\eta_{ном}$.
3. Значение пускового момента при токе $I_{пуск}=2I_{ном}$ и соответствующее сопротивление пускового реостата.
4. Частоту вращения якоря при $I_{я.ном}$, при введенном в цепь возбуждения добавочном сопротивлении, увеличивающем заданное в условии задачи значение R_B на 30%.

5. Построить естественную механическую характеристику двигателя.

Данные для расчета приведены в таблице 3.9 в соответствии с последней цифрой индивидуального плана(зачетной книжки).

Таблица 3.9 - Числовые данные

Вариант	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$I_{\text{ном}}, \text{А}$	$I_0, \text{А}$	$R_{\text{я}}, \text{Ом}$	$R_{\text{в}}, \text{Ом}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$
1	110	9,5	0,9	1,9	200	850
2	110	20	1,8	0,7	80	940
3	220	15	1,5	0,82	200	1350
4	110	8,2	0,8	1,4	220	1450
5	220	20,5	2,35	0,74	258	1025
6	220	40	4,2	0,52	190	1420
7	110	10,5	1,2	1,2	160	960
8	110	18,6	2,0	0,9	120	825
9	220	16	1,8	0,6	270	1600
0	220	32	3,5	0,62	200	1350

ЗАДАЧА 3.6.3. Для заданного в таблице 3.10 режима нагрузки производственного механизма построить нагрузочную диаграмму $M=f(t)$ и выбрать мощность асинхронного короткозамкнутого двигателя. Двигатель должен развивать частоту вращения $n=720$ об/мин.

Данные для расчета выбираются в таблице 3.10 в соответствии с последней цифрой индивидуального плана (зачетной книжки).

Таблица 3.10 - Числовые данные

Вариант	t1, с	t2, с	t3, с	t4, с	t5, с	M1, кВт	M2, кВт	M3, кВт	M4, кВт	M5, кВт
1	15	25	10	35	30	0	4	8	0	5
2	20	75	60	50	10	30	5	0	15	25
3	7	3	15	4	2	25	10	0	13,5	8
4	1	1,5	2,5	1,5	1,5	8	5	0	25	10
5	1	4	2,5	3,5	3	0	4	8	0	50
6	30	45	30	15	20	8	5	0	25	10
7	10	15	20	40	40	20	10	6	8	8
8	20	10	10	20	30	8	5	0	25	10
9	50	10	15	20	35	8	4	15	10	25
0	20	10	15	15	20	30	5	0	15	25

3.7. Цифровые комбинационные устройства

ЗАДАЧА 3.7. Разработать преобразователь кода по схеме дешифратор - шифратор с шифратором, выполненным по матричной диодной схеме, для преобразования входной функции в соответствующую выходную функцию.

Считать, что входная функция задана двоичным 4-х разрядным кодом, выходная - двоичным 5-ти разрядным кодом. Диапазон изменения аргумента X от 0 до 1 с дискретностью 0,1.

Изобразить схему разработанного преобразователя кодов, указав разряды входного кода в позиционной форме X₁, X₂, X₃, X₄, аналогично обозначить разряды выходного кода Y₁, Y₂, Y₃, Y₄, Y₅.

Данные для расчета указаны в таблице 3.11. Вариант выбирается по последней цифре индивидуального плана (зачетной книжки).

Таблица 3.11- Вид входной и выходной функций

Вариант	Входная функция	Выходная функция
1	$1 - x \sin^2 \pi x$	$\sin \pi x$
2	$1 - x \cos^2 \pi x$	$\cos \pi x$
3	$\sin \pi x$	$\sqrt{1 - \sin \pi x}$
4	$\sin \pi x$	$\sqrt{1 - \cos \pi x}$
5	$\cos \pi x$	$\sqrt{1 - \sin \pi x}$
6	$\cos \pi x$	$\sqrt{1 - \cos \pi x}$
7	$(1 - \sin \pi x)^2$	$\sin \pi x$
8	$(1 - \sin \pi x)^2$	$\cos \pi x$
9	$(1 - \cos \pi x)^2$	$\sin \pi x$
0	$(1 - \cos \pi x)^2$	$\cos \pi x$

3.8. Цифровые устройства с памятью

ЗАДАЧА 3.8. Разработать на основе микросхем К155ИЕ6 и К155ИЕ7 делитель частоты последовательности импульсов, работающий с двоичными и двоично-десятичными кодами, с коэффициентом деления $K_{\text{дел}}$, заданным таблицей 3.12. Построить и нарисовать схему, дать описание микросхем.

Вариант выбирается по последней цифре индивидуального плана (зачетной книжки).

Таблица 3.12- Числовые данные

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$K_{\text{дел}}$	2783	2783	1562	1562	792	800	1002	4735	3250	1263

3.8. Устройства преобразования электрических сигналов

ЗАДАЧА 3.9.1. Рассчитать выпрямитель для транзисторного стабилизатора напряжения. Составить принципиальную схему, пояснить её работу и назначение элементов.

По исходным данным, приведённым в таблице 3.13 и методике ука-

занной в задаче 4.18 найти основные параметры схемы.

На основании полученных параметров выбрать тип диодов выпрямителя и значение емкости конденсатора сглаживающего фильтра. Вариант выбирается по последней цифре индивидуального плана (зачетной книжки).

Таблица 3.13 – Исходные данные для расчёта выпрямителя

№ варианта Данные	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Минимальное выпрямленное напряжение $U_{0\min}$, В	30	28	32	25	28	30	26	28	32	30
Минимальный ток нагрузки выпрямителя $I_{0\min}$, А	0,1	0,05	0,06	0,08	0,05	0,07	0,1	0,06	0,04	0,1
Максимальный ток нагрузки выпрямителя $I_{0\max}$, А	0,65	0,5	0,6	0,4	0,5	0,5	0,6	0,55	0,4	0,5
Амплитуда пульсации выпрямленного напряжения $U_{0\sim}$ не более, В	0,5	0,1	0,2	0,4	0,3	0,5	0,2	0,1	0,2	0,1
Напряжение питающей сети $220 \pm \%$, В	10%	15%	10%	10%	10%	15%	10%	15%	10%	10%
Частота сети f_c , Гц	50	50	400	400	50	50	400	400	50	50

ЗАДАЧА 3.9.2. Определить напряжение на выходе диодного ограничителя с параметрами, указанными в таблице 3.14, при действии на входе синусоидального напряжения. Диод считать идеальным.

Изобразить временные диаграммы входного и выходного напряжения, напряжения на диоде и тока, протекающего через диод. Определить пределы изменения напряжения на выходе ограничителя.

Вариант выбирается в соответствии с последней цифрой индивидуального плана (зачетной книжки).

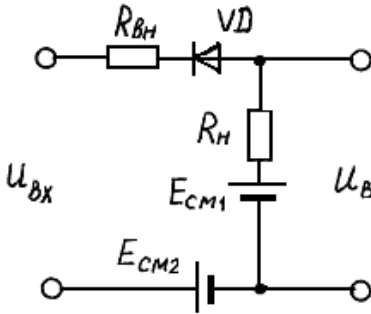


Рисунок 3.11

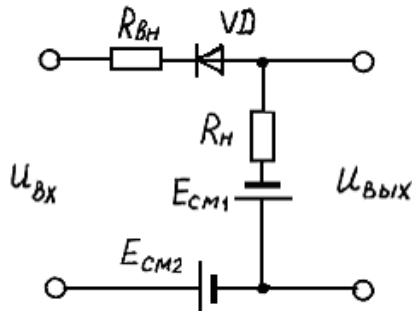


Рисунок 3.12

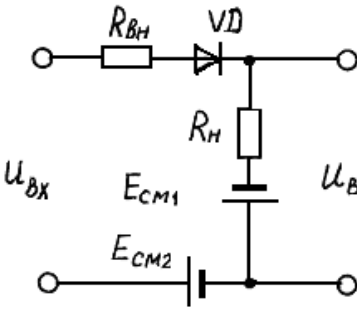


Рисунок 3.13

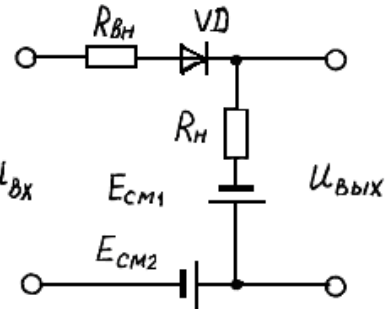


Рисунок 3.14

Таблица 3.14-Числовые данные

Вариант	Рисунок	U_{BX} , В	E_{CM1} , В	E_{CM2} , В	R_H , кОм	R_{BH} , кОм
1	3.11	30	10	15	1	0,1
2	3.12	40	15	20	2	0,1
3	3.13	50	20	10	3	0,2
4	3.14	60	10	20	4	0,2
5	3.11	70	30	20	5	0,25
6	3.12	30	10	10	1	0,1
7	3.13	40	15	15	2	0,1
8	3.14	50	20	20	3	0,2
9	3.11	60	10	10	2	0,2
0	3.12	70	30	20	5	0,25

3.10. Генераторы импульсов

ЗАДАЧА 3.10. Мультивибратор генерирует прямоугольные колебания напряжения.

Определите период и скважность колебаний U_1 . Нарисуйте временные диаграммы напряжений U_1 , U_2

Расчет скважности производите относительно длительности положительного импульса выходного напряжения, считая диоды идеальными.

Данные для расчетов:

$R_1=R_2=10(n+m+1)$ кОм, $R_3=(n+1)R_2$, $R_4=(m+1)$ кОм,
 $C_1=0,1(n+m+1)$ мкФ.

Вариант выбирается по последней (n) и предпоследней цифре (m) индивидуального плана (зачетной книжки).

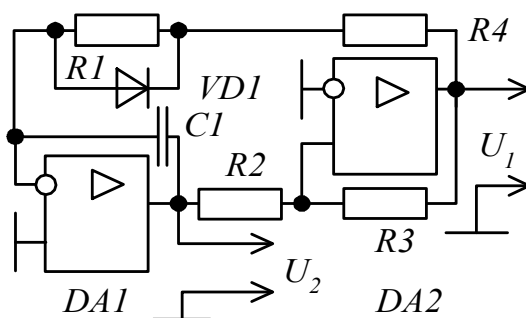


Рисунок 3.15 – Схема для $n=1, n=2, n=3$

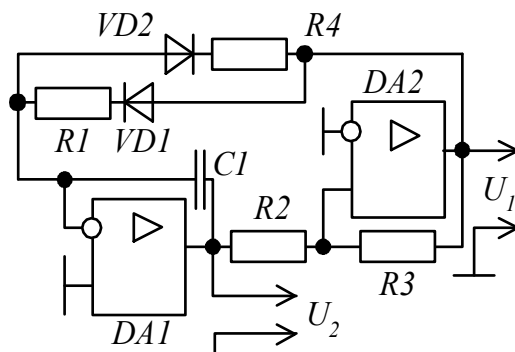
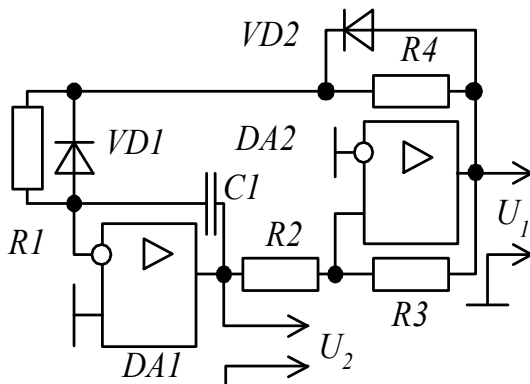


Рисунок 3.16 – Схема для $n=4, n=5, n=6$

Рисунок 3.17– Схема для $n=7, n=8, n=9, n=0$

4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И УСТРОЙСТВ

ЗАДАЧА 4.1. Для цепи (рисунок 4.1), даны: $E=20\text{ В}$; $J=2\text{ А}$; $R=15\text{ Ом}$; $R_1=85\text{ Ом}$; $I=1,5\text{ А}$; $I_1=0,5\text{ А}$. Проверить баланс мощностей.

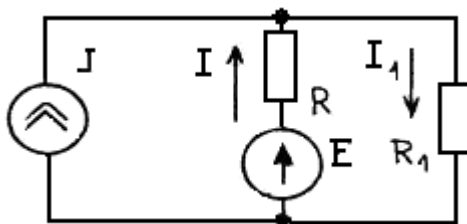


Рисунок 4.1- Схема цепи к задаче 4.1

РЕШЕНИЕ [9].

Для расчета баланса мощностей необходимо знать напряжение на источнике тока. Его находим по ветвям внешним по отношению к зажимам источника тока. Напряжение $U_{AB} = I_1 \cdot R_1 = 42,5\text{ В}$.

Составляем баланс мощностей

$$U_{AB} \cdot J + E \cdot I = I^2 \cdot R + I_1^2 \cdot R_1.$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$42,5 \cdot 2 + 20 \cdot (-1,5) = (-1,5)^2 \cdot 15 + 1,5^2 \cdot 85.$$

Получим тождество: $55=55$.

ЗАДАЧА 4.2. Для цепи (рисунок 4.2а) заданы параметры: $E_1=25$ В; $J_2=125$ мА, $R_1=100$ Ом; $R_H=500$ Ом; $R_2=2$ кОм.

Определить токи во всех ветвях, применив метод наложения. Рассчитать мощность сопротивления нагрузки R_H .

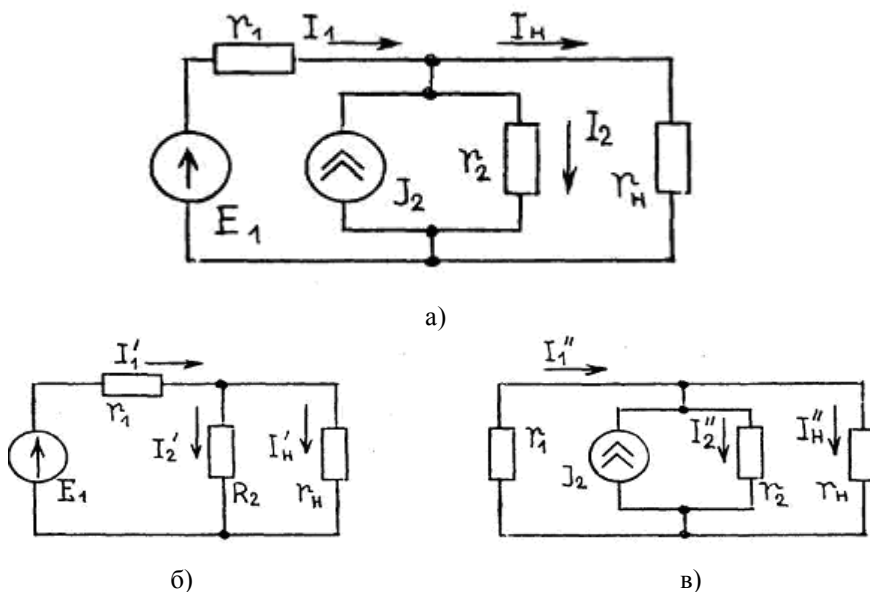


Рисунок 4.2 – Схемы цепи к задаче 4.2

РЕШЕНИЕ [9].

При расчете цепи с применением метода наложения рассматриваем отдельно действие источника ЭДС E_1 и источника тока J_2 .

Эквивалентные схемы для частичных токов изображены на рисунках 4.2б,в. При действии источника ЭДС E_1 токи в ветвях схемы (рисунок 4.2,б) равны:

$$I_2' = 0,01A; I_1' = 0,05A; I_H' = 0,04A.$$

При действии источника тока J_2 токи в ветвях схемы (рисунок 4.2,в)

равны:

$$I_2'' = 0,005 \text{ A}; I_1'' = -0,10 \text{ A}; I_H'' = 0,02 \text{ A}.$$

Истинные токи определим

$$I_1 = I_1' + I_1'' = -0,05 \text{ A} = -50 \text{ mA}; I_2 = I_2' + I_2'' = 0,015 \text{ A} = 15 \text{ mA};$$

Ток нагрузки:

$$I_H = I_H' + I_H'' = 0,06 \text{ A} = 60 \text{ mA}.$$

$$\text{Мощность сопротивления нагрузки } P_H = R_H \cdot I_H^2 = 1,8 \text{ Вт}.$$

ЗАДАЧА 4.3. Методом контурных токов найти токи в цепи, схема которой изображена на рисунке 4.3. Даны $E_1=100 \text{ В}$; $E_2=30 \text{ В}$; $E_3=10 \text{ В}$; $E_4=6 \text{ В}$; $R_1=10 \text{ Ом}$; $R_2=10 \text{ Ом}$; $R_4=6 \text{ Ом}$; $R_5=5 \text{ Ом}$; $R_6=15 \text{ Ом}$; $r_4=1 \text{ Ом}$.

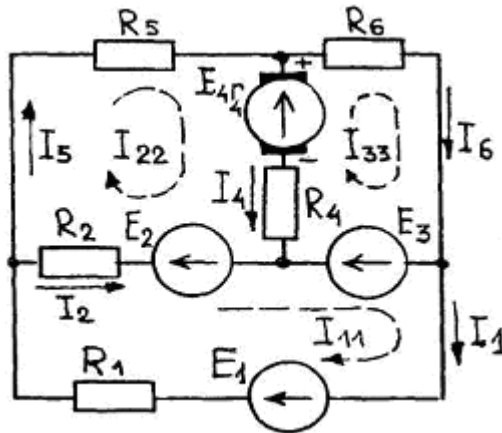


Рисунок 4.3 – Схема цепи к задаче 4.3

РЕШЕНИЕ [9]

Выберем направления контурных токов, которые обозначим через

$$I_{11}, I_{22}, I_{33}.$$

Составим систему уравнений для контуров:

$$\begin{aligned} (R_1 + R_2) \cdot I_{11} - R_2 \cdot I_{22} &= E_1 - E_2 - E_3; \\ (R_2 + R_5 + R_4 + r_4) \cdot I_{22} - (R_4 + r_4) \cdot I_{33} - R_2 \cdot I_{11} &= E_2 - E_4; \\ (R_6 + R_4 + r_4) \cdot I_{33} - (R_4 + r_4) \cdot I_{22} &= E_3 + E_4. \end{aligned}$$

После подстановки числовых значений имеем:

$$\begin{aligned} 20 \cdot I_{11} - 10 \cdot I_{22} &= 60; \\ -10 \cdot I_{11} + 22 \cdot I_{22} - 7 \cdot I_{33} &= 24; \\ -7 \cdot I_{22} + 22 \cdot I_{33} &= 16. \end{aligned}$$

Решив эту систему уравнений, найдем контурные токи:

$$I_{11} = 5A; I_{22} = 4A; I_{33} = 2A,$$

а затем - истинные токи во всех ветвях.

В ветви, где действует э.д.с. E_1 , истинный ток I_1 имеет направление контурного тока I_{22} и равен $I_1 = I_{11} = 5A$.

В ветви с сопротивлением R_5 истинный ток I_5 имеет направление контурного тока I_{22} и равен $I_5 = I_{22} = 4A$.

В ветви с сопротивлением R_6 истинный ток I_6 имеет направление контурного тока I_{33} и равен $I_6 = I_{33} = 2A$.

В ветви с сопротивлением R_2 , истинный ток I_2 получится наложением контурных токов I_{11} и I_{22} и, будет иметь направление большего контурного тока I_{11} :

$$I_2 = I_{11} - I_{22} = 5 - 4 = 1A.$$

В ветви с сопротивлением R_4 , истинный ток I_4 получится наложением контурных токов I_{22} и I_{33} и будет иметь направление контурного тока I_{22}

$$I_4 = I_{22} - I_{33} = 4 - 2 = 2A.$$

В ветви, где действует э.д.с. E_3 , истинный ток I_3 получится от наложения контурных токов I_{11} и I_{33} и будет иметь направление контурного тока I_{11} :

$$I_{33} = I_{11} - I_{33} = 5 - 2 = 3A.$$

ЗАДАЧА 4.4. Для схемы на рисунке 4.4, пользуясь методом узловых потенциалов, определить все токи. Дано: $E_1=30B$; $E_2=10B$; $E_3=200B$; $E_4=56B$; $R_1=20\Omega$; $R_2=30\Omega$; $R_3=6\Omega$; $R_4=8\Omega$; $R_5=15\Omega$; $R_6=40\Omega$; $R_7=10\Omega$.

РЕШЕНИЕ [9]

Примем потенциал точки 3 равным нулю ($\varphi_3 = 0$). Тогда запишем систему уравнений для определения потенциалов точек 1 и 2:

$$\begin{aligned} G_{11} \cdot \varphi_1 - G_{12} \cdot \varphi_2 &= E_1 \cdot \frac{1}{R_1 + R_7} - E_4 \cdot \frac{1}{R_4}; \\ G_{12} \cdot \varphi_1 - G_{11} \cdot \varphi_2 &= -E_1 \cdot \frac{1}{R_1 + R_7} + E_2 \cdot \frac{1}{R_2} - E_3 \cdot \frac{1}{R_3}. \end{aligned}$$

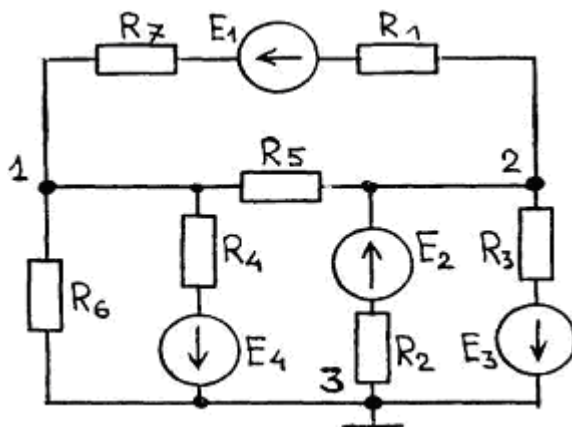


Рисунок 4.4 – Схема цепи к задаче 4.4

Подсчитаем G_{11} - сумму проводимостей ветвей, присоединенных к узлу 1:

$$G_{11} = 1/(R_1 + R_7) + 1/R_5 + 1/R_4 + 1/R_6 = 1/30 + 1/15 + 1/8 + 1/40 = 0,25 \text{ Сим.}$$

Аналогично G_{22} - сумма проводимостей ветвей, присоединенных к узлу 2:

$$G_{22} = 1/(R_1 + R_7) + 1/R_5 + 1/R_2 + 1/R_3 = 1/30 + 1/15 + 1/30 + 1/6 = 0,3 \text{ Сим.}$$

Сумма проводимостей, соединяющих первый и второй узлы:

$$G_{12} = G_{21} = 1/(R_1 + R_7) + 1/R_5 = 1/30 + 1/15 = 0,1 \text{ Сим.}$$

Подставляя числовые значения в уравнения для потенциалов узлов, получим:

$$0,25 \cdot \varphi_1 - 0,1 \cdot \varphi_2 = 30 \cdot \frac{1}{30} - 56 \cdot \frac{1}{8};$$

$$0,1 \cdot \varphi_1 - 0,3 \cdot \varphi_2 = -30 \cdot \frac{1}{30} + 10 \cdot \frac{1}{30} - 200 \cdot \frac{1}{6}.$$

Решив последние два уравнения, найдем потенциалы точек 1 и 2:

$$\varphi_1 = -80\text{В}; \quad \varphi_2 = -140\text{В}.$$

Применяя закон Ома для отдельных ветвей, определим искомые токи:

$$I_1 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 - E_1}{R_1} = \frac{-80 + 140 - 30}{30} = 1\text{А};$$

$$I_5 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_5} = \frac{-80 + 140}{15} = 4\text{А}$$

$$I_2 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2 + E_2}{R_2} = \frac{140 + 10}{30} = 5 A;$$

$$I_6 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1}{R_6} = \frac{80}{40} = 2 A$$

$$I_3 = \frac{\varphi_2 - \varphi_3 + E_3}{R_3} = \frac{-140 + 10}{30} = 10 A;$$

$$I_4 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1 - E_4}{R_4} = \frac{80 - 56}{8} = 3 A;$$

ЗАДАЧА 4.5. Для схемы цепи рисунке 4.5,а методом эквивалентного источника э.д.с. найти ток в ветви резистора, сопротивление которого R_1 , если $E_1=18\text{В}$; $E_2=21\text{В}$; $r_1=1\text{Ом}$; $R_1=2\text{Ом}$; $r_2=2\text{Ом}$; $R_2=7\text{Ом}$; $R_3=6\text{Ом}$.

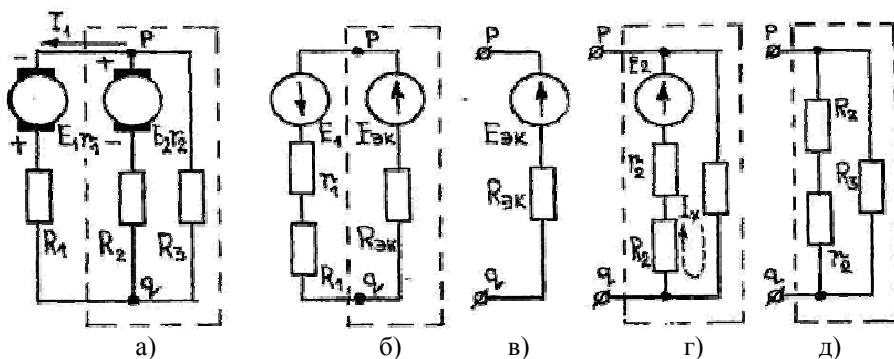


Рисунок 4.5 – Схемы цепи к задаче 4.5

РЕШЕНИЕ [9]

Обозначим положительное направление искомого тока на исходной схеме (рисунок 4.5,а). Рассмотрим часть схемы, подключенную к исследуемой первой ветви (обведенную штриховой линией), в качестве эквивалентного источника э.д.с. $E_{\text{эк}}$ и сопротивлением $R_{\text{эк}}$. Нарисуем эквивалентную электрическую схему с эквивалентным источником напряжения (рисунок 4.5,б).

На схеме произвольно выбрано положительное направление э.д.с.; эквивалентного источника $E_{\text{эк}}$ к точке p . Это позволяет записать для режима холостого хода эквивалентного источника с отключенной первой

ветвью (рисунок 4.5, в)

$$E_{\text{эк}} = U_{pq} = V_p - V_q.$$

Развернутая схема эквивалентного источника в режиме холостого хода показана на рисунке 4.5 г. Во внутренних ветвях источника ток

$$I_x = \frac{E_2}{R_3 + R_2 + r_2} = \frac{21}{15} = 1,4 \text{ А}.$$

Напряжение холостого хода определяет э.д.с. источника:

$$U_{pq} = R_3 \cdot I_x = 6 \cdot 1,4 = 8,4 \text{ В} = E_{\text{эк}}.$$

Найдем сопротивление $R_{\text{эк}}$ эквивалентного источника.

Для подсчета сопротивления источника преобразуем его схему (рисунок 4.5, г), заменив источник напряжения E_2 короткозамкнутым участком (рисунок 4.5, д). Входное сопротивление последней схемы является сопротивлением эквивалентного источника

$$R_{\text{эк}} = \frac{(R_2 + r_2) \cdot R_3}{R_2 + r_2 + R_3} = \frac{9 \cdot 6}{15} = 3,6 \text{ Ом}.$$

Возвращаясь к схеме рисунку 4.5 б, найдем искомый ток по закону Ома

$$I_1 = \frac{E_{\text{эк}} + E_1}{R_{\text{эк}} + r_1 + R_1} = \frac{8,4 + 18}{3,6 + 1 + 2} = 4 \text{ А}.$$

ЗАДАЧА 4.6. Рассчитать электрическую цепь синусоидального тока, схема которой изображена на рисунок 4.6.а. 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 I_1, I_2, I_3 в ветвях цепи, напряжения на участках цепи U_{ab}, U_{bc} , активную, реактивную и полную мощности и построить векторную диаграмму на комплексной плоскости.

РЕШЕНИЕ [9, 12]

Выражаем сопротивления ветвей цепи в комплексной форме:

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

$$Z_1 = R_1 + j\omega \cdot L_1 = 10 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 19,1 \cdot 10^{-3} = 10 + j6 \text{ Ом}.$$

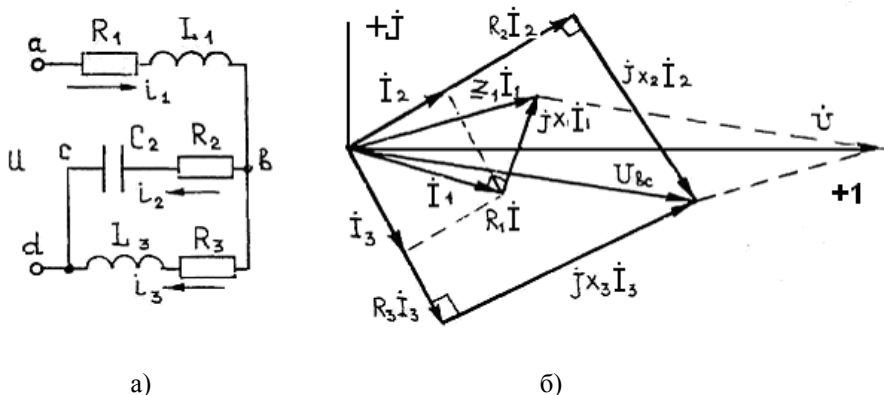


Рисунок 4.6 – Схема цепи и векторная диаграмма к задаче 4.6

Переходя от алгебраической формы записи комплексного числа к показательной получаем:

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

$$\text{где } \underline{Z}_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega \cdot L_1)^2}; \quad \text{tg } \varphi_1 = \frac{\omega \cdot L_1}{R_1};$$

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

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j\omega \cdot L_3 = 15 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 63,5 \cdot 10^{-3} = 15 + j20 = 25 e^{j53^\circ 15' / 1} \text{ Ом}.$$

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 $\dot{U} = U = 120 \text{ В}$. Полное комплексное сопротивление цепи

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 10 + j6 + \frac{(24 - j7) \cdot (15 + j20)}{39 + j13} = 10 + j6 + \frac{25 e^{-j16^\circ 15' / 1} \cdot 25 e^{j53^\circ 05' / 1}}{41 e^{j18^\circ 25' / 1}} = \\ &= 24,4 + j \cdot 10,8 = 26,7 e^{j23^\circ 55' / 1} \text{ Ом} \end{aligned}$$

Определяем ток в неразветвленной части цепи

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

Токи I_2 и I_3 в параллельных ветвях могут быть выражены через ток неразветвленной части цепи:

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \dot{I} \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 4,5 e^{-j23^\circ 55'} \cdot \frac{15 + j20}{39 + j13} = 2,74 e^{j10^\circ 35'} \text{ A}; \\ \dot{I}_3 &= \dot{I}_1 \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 4,5 e^{-j23^\circ 55'} \cdot \frac{24 - j7}{39 + j13} = 2,74 e^{-j58^\circ 35'} \text{ A}. \end{aligned}$$

Токи I_2 и I_3 можно найти иначе:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{bc} &= \underline{Z}_{bc} \cdot \dot{I}_1 = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} \cdot \dot{I}_1 = \frac{(24 - j7) \cdot (15 + j20)}{39 + j13} \cdot 4,5 e^{-j23^\circ 55'} = \\ &= 68,4 e^{-j5^\circ 30'} \text{ В}; \\ \dot{I}_2 &= \dot{U}_{bc} / \underline{Z}_2 = 68,4 e^{-j5^\circ 30'} / 25 e^{-j16^\circ 15'} = 2,74 e^{j10^\circ 45'} \text{ A}; \\ \dot{I}_3 &= \dot{U}_{bc} / \underline{Z}_3 = 68,4 e^{-j5^\circ 30'} / 25 e^{j53^\circ 05'} = 2,74 e^{-j58^\circ 35'} \text{ A}. \end{aligned}$$

Найдем мощности всей цепи и отдельных ее ветвей:

$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}_1^* = 120 \cdot 4,5 e^{j23^\circ 55'} = 540 e^{j23^\circ 55'} \text{ В} \cdot \text{А}.$$

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

$$\begin{aligned} S &= 540 \cdot \cos(23^\circ 55') + j \cdot 540 \cdot \sin(23^\circ 55') = 494 + j \cdot 218 \text{ В} \cdot \text{А}, \\ \text{откуда } P &= 494 \text{ Вт}; Q = 218 \text{ ВАР}. \end{aligned}$$

Активную и реактивную мощности можно найти иначе:

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

$$\begin{aligned} P_1 &= R_1 \cdot I_1^2 = 10 \cdot 4,5^2 = 202 \text{ Вт}; \\ P_2 &= R_2 \cdot I_2^2 = 180 \text{ Вт}; \\ P_3 &= R_3 \cdot I_3^2 = 112 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

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

$$Q = \operatorname{Im}[\dot{U} \cdot I_1^*] = \operatorname{Im}[120 \cdot 4,5 e^{j23^\circ 55'}] = 120 \cdot 4,5 \cdot \sin(23^\circ 55') = 218 \text{ ВАР};$$

$$Q_1 = X_1 \cdot I_1^2 = 6 \cdot 4,5^2 = 122 \text{ ВАР};$$

$$Q_2 = X_2 \cdot I_2^2 = -52,5 \text{ ВАР};$$

$$Q_3 = X_3 \cdot I_3^2 = 150 \text{ ВАР}.$$

Учитывая, что Q_1 и Q_3 – положительны (реактивная мощность индуктивных катушек), а Q_2 – отрицательна (реактивная мощность конденсатора), получим

$$Q = Q_1 - Q_2 + Q_3 = 218 \text{ ВАР}.$$

На рисунке 4.6, б 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 $R_1 \cdot \dot{I}_1$ и перпендикулярно к нему в сторону опережения – вектор $jX_1 \cdot \dot{I}_1$. Их сумма дает вектор $Z_1 \cdot \dot{I}_1$. Далее в фазе с $\dot{I}_2$ построен вектор $R_2 \cdot \dot{I}_2$ и перпендикулярно к нему в сторону отставания вектор $jX_2 \cdot \dot{I}_2$, 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 $R_3 \cdot \dot{I}_3$ и к нему прибавить вектор $jX_3 \cdot \dot{I}_3$, опережающий $\dot{I}_3$ на 90° . Сумма векторов $Z_1 \cdot \dot{I}_1$ и $\dot{U}_{bc}$ дает вектор приложенного напряжения $\dot{U}$.

ЗАДАЧА 4.7. В трехфазную сеть с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$, включен приемник, соединенный треугольником, сопротивление каждой фазы которого $\underline{Z} = (10 + j 10) \text{ Ом}$ (рисунок 4.7, а). 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.

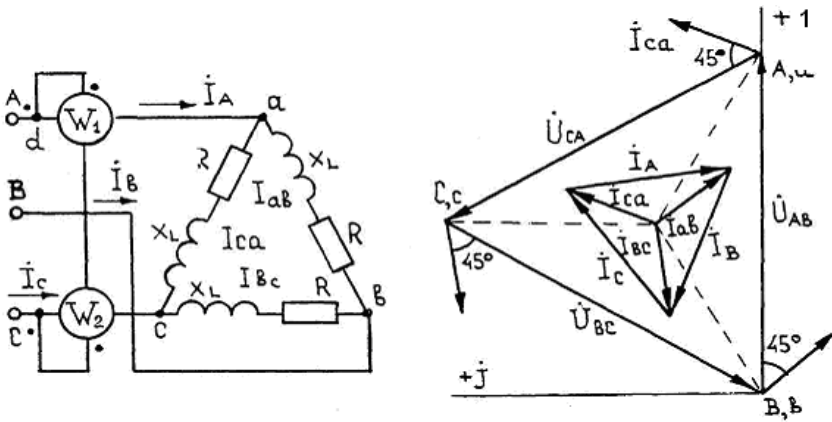
РЕШЕНИЕ [3,9].

Расчет токов в трехфазных цепях производится комплексным методом. Примем, что вектор линейного напряжения U_{AB} направлен по действительной оси, тогда

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab} = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc} = 220 e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

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



а)

б)

Рисунок 4.7 – Схема цепи и векторная диаграмма к задаче 4.7

Определяем фазные токи:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / \underline{Z} = 220 / (10 + j10) = 15,6 e^{-j45^\circ} = 11 - j11 \text{ A};$$

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

$$\dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / \underline{Z} = 220 e^{j120^\circ} / (10 + j10) = 15,6 e^{j75^\circ} = 4,03 + j15 \text{ A}.$$

Находим линейные токи:

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

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = -26 + j6,97 = 26,9 e^{-j165^\circ} \text{ A};$$

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

Определяем показания ваттметров:

$$P_1 = \operatorname{Re} \left[U_{AB} \cdot \dot{I}_A^* \right] = \operatorname{Re} \left[220 \cdot 26,9 e^{j75^\circ} \right] = 220 \cdot 26,9 \cdot \cos 75^\circ = 1530 \text{ Вт};$$

$$P_2 = \operatorname{Re} \left[U_{CB} \cdot \dot{I}_C^* \right] = \operatorname{Re} \left[-220 e^{-j120^\circ} \cdot 26,9 e^{j45^\circ} \right] = \operatorname{Re} \left[220 e^{j60^\circ} \cdot 26,9 e^{-j45^\circ} \right] = 220 \cdot 26,9 \cdot \cos 15^\circ = 5730 \text{ Вт}.$$

Находим активную мощность цепи (алгебраическая сумма показаний ваттметров)

$$P = P_1 + P_2 = 1530 + 5730 = 7260 \text{ Вт}$$

или

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

На рисунке 4.7, б приводится векторная диаграмма напряжений и токов. При обрыве в точке d токи в фазах нагрузки будут :

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

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

Вычислим линейные токи:

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

Находим показания ваттметров: $P_1 = 0$;

$$P_2 = \operatorname{Re}[\dot{U}_{CB} \cdot \dot{I}_C^*] = \operatorname{Re}[220 e^{j60^\circ} \cdot 23,3 e^{-j15^\circ}] = 220 \cdot 23,3 \cdot \cos 45^\circ = 3630 \text{ Вт.}$$

ЗАДАЧА 4.8. В четырехпроводную трехфазную сеть с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ включен звездой приемник, активные и индуктивные сопротивления фаз которого соответственно равны : $R_a = 3 \text{ Ом}$; $X_a = 4 \text{ Ом}$; $R_b = 3 \text{ Ом}$; $X_b = 5,2 \text{ Ом}$; $R_c = 4 \text{ Ом}$; $X_c = 3 \text{ Ом}$ (рисунок 4.8а). Определить токи в линейных и нейтральном проводах и построить векторную диаграмму.

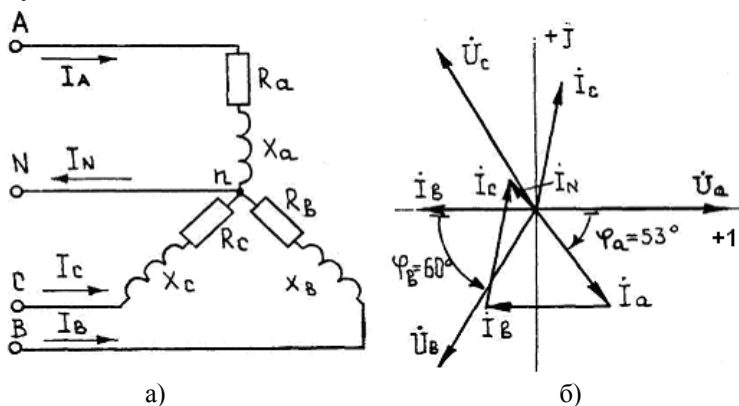


Рисунок 4.8 – Схема цепи и векторная диаграмма к задаче 4.8

РЕШЕНИЕ [3,9].

Считаем, что вектор фазного напряжения U_a направлен по действительной оси, тогда

$$\dot{U}_a = U_n / \sqrt{3} = 127 \text{ В};$$

$$\dot{U}_b = 127 e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_c = 127 e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Находим линейные токи:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a = 127 / (3 + j4) = 127 / (5 e^{j53^\circ}) = 25,54 e^{-j53^\circ} \text{ А};$$

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

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

Ток в нейтральном проводе определяется как геометрическая сумма линейных токов:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 25,4 e^{-j53^\circ} + 21,2 e^{-j180^\circ} + 25,4 e^{j83^\circ} = 5,9 e^{j24^\circ} \text{ А}.$$

Векторная диаграмма показана на рисунке 4.8, б.

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

ЗАДАЧА 4.9. Определить ток переходного процесса при подключении индуктивной катушки (последовательно соединенные элементы с параметрами R и L) к источнику постоянного напряжения и к источнику синусоидального напряжения. Привести график тока на индуктивном элементе.

Если $R=10 \text{ Ом}$, $L=0,1 \text{ Гн}$ для постоянного напряжения $U=100 \text{ В}$ и для синусоидального напряжения $u(t) = 100 \cdot \sin(\omega t + 30^\circ) \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$.

РЕШЕНИЕ [9].

Постоянное напряжение.

Определяем ток установившегося состояния:

$$i_y = U/R = 100/10 = 10 \text{ А}.$$

Уравнение свободного тока

$$0 = R \cdot i_{CB} + L \cdot di_{CB}/dt.$$

Его характеристическое уравнение

$$0 = R + L \cdot p.$$

Корень характеристического уравнения

$$p = -R/L = -10/0,1 = -100.$$

Свободный ток

$$i_{св} = C \cdot e^{pt} = C \cdot e^{-100t} \text{ А.}$$

Ток переходного процесса

$$i = i_y + i_{св} = 10 + C \cdot e^{-100t} \text{ А.}$$

Определяем постоянную интегрирования C . Полагая $t=0$ и учитывая, что ток в индуктивной катушке скачком возникнуть не может (цепь до начала переходного процесса была разомкнута, $i=0$), получаем

$$i(t=0) = i_y(t=0) + i_{св}(t=0) = 10 + C, \text{ откуда } C = -10.$$

Таким образом, ток переходного процесса будет равен:

$$i(t) = 10 - 10e^{-100t} \text{ А.}$$

Синусоидальное напряжение.

Определяем установившийся ток:

$$Z = R + j\omega \cdot L = 10 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,1 = 10 + j31,4 = 33e^{j72^\circ} \text{ Ом;}$$

$$\dot{I}_{my} = \frac{\dot{U}_m}{Z} = 100e^{j30^\circ} / 33e^{j72^\circ} = 3e^{-j42^\circ} \text{ А;}$$

$$i_y(t) = 3 \cdot \sin(\omega t - 42^\circ) \text{ А.}$$

Так как свободный ток не зависит от напряжения, то воспользуемся его выражением, полученным в предыдущей задаче. Тогда ток переходного процесса равен

$$i = i_y + i_{св} = 3 \cdot \sin(\omega t - 42^\circ) + C e^{-100t};$$

Определяем постоянную интегрирования C :

$$i(t=0) = 3 \cdot \sin(-42^\circ) + C = -2 + C = 0.$$

Откуда $C = 2$.

Таким образом, ток переходного процесса

$$i(t) = 3 \cdot \sin(\omega t - 42^\circ) + 2e^{-100t} \text{ А.}$$

ЗАДАЧА 4.10. Определить ток переходного процесса в цепи с последовательным соединением конденсатора и резистора при подключении ее как к источнику постоянного напряжения, так и к источнику синусоидального напряжения. Изобразить график напряжения на конденсаторе. Дано: $R=10 \text{ Ом}$, $C=200 \text{ мкФ}$ для постоянного напряжения $U=100 \text{ В}$, для синусоидального напряжения

$$u(t) = 100 \cdot \sin(\omega t + 30^\circ) \text{ В, } f = 50 \text{ Гц.}$$

РЕШЕНИЕ [9].

Постоянное напряжение. Установившийся ток в цепи с конденсатором, подключенной к постоянному напряжению, равен нулю, так как конденсатор, зарядившись до величины питающего напряжения, размыкает цепь.

Следовательно, ток переходного процесса определяется только свободным током. Уравнение свободного тока

$$0 = \dot{R} \cdot i_{CB} + \frac{1}{C} \int i_{CB} dt.$$

Дифференцируя уравнение свободного тока, получаем

$$0 = R \cdot \frac{di_{CB}}{dt} + \frac{i_{CB}}{C},$$

тогда характеристическое уравнение

$$0 = R \cdot p + 1/C,$$

откуда корень характеристического уравнения

$$p = -1/(R \cdot C) = -10^6 / 10 \cdot 200 = -500.$$

Ток переходного процесса

$$i = i_{CB} = B e^{pt} = B e^{-500t} \text{ A.}$$

Определяем постоянную интегрирования B . Полагая $t=0$ и учитывая, что напряжение на конденсаторе скачком возникнуть не может (конденсатор до начала переходного процесса не был заряжен, $u_c = 0$), получаем

$$i(t=0) = B = U/R = 100/10 = 10 \text{ A.}$$

Таким образом, ток переходного процесса

$$i(t) = 10 e^{-500t} \text{ A.}$$

Синусоидальное напряжение.

Определяем установившийся ток

$$Z = R - j \frac{1}{\omega C} = 10 - j \frac{1}{\omega C} = 10 - j16 = 19 e^{-j58^\circ} \text{ Ом;}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{my} &= \frac{\dot{U}_m}{Z} = \frac{100 e^{j30^\circ}}{19 e^{-j58^\circ}} = 5,3 e^{j88^\circ} \text{ A;} \\ i_y(t) &= 5,3 \cdot \sin(\omega t + 88^\circ) \text{ A.} \end{aligned}$$

Воспользуемся выражением для свободного тока из предыдущей задачи. Тогда ток переходного процесса

$$i(t) = i_y + i_{CB} = 5,3 \sin(\omega t + 88^\circ) + B e^{-500t}.$$

Определяем постоянную интегрирования A :

$$i(t=0) = 5,3 \sin 88^\circ + B = 5,3 + B,$$

откуда $B = i(t=0) - 5,3$.

Найдем ток $i(t=0)$ в момент включения:

$$i(t=0) = u(t=0)/R = 100 \cdot \sin 30^\circ / 10 = 5 \text{ A},$$

следовательно, $B = 5 - 5,3 = -0,3$.

Таким образом, ток переходного процесса

$$i(t) = 5,3 \sin(\omega t + 88^\circ) - 0,3 e^{-500t} \text{ A}.$$

ЗАДАЧА 4.11. Для трехфазного трансформатора мощностью $S_{\text{НОМ}} = 100 \text{ кВА}$, соединения обмоток которого $Y/Y - 0$, известно:

номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора $U_{\text{НОМ}} = 6000 \text{ В}$;

напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки трансформатора $U_{20} = 400 \text{ В}$;

напряжение короткого замыкания $u_k = 5,5\%$;

мощность короткого замыкания $P_k = 2400 \text{ Вт}$;

мощность холостого хода $P_0 = 600 \text{ Вт}$;

ток холостого хода $I_0 = 0,07 I_{\text{НОМ}}$.

Определить:

1) сопротивление обмоток трансформатора R_1, X_1, R_2, X_2 ;

2) эквивалентное сопротивление Z_0 (сопротивление намагничивающей цепи) и его составляющие R_0, X_0 , которыми заменяется магнитная цепь трансформатора;

3) угол магнитных потерь δ .

Построить характеристики трансформатора:

зависимость $U_2 = f_1(\beta)$ напряжения U_2 от коэффициента нагрузки β (внешняя характеристика);

зависимость $\eta = f_2(\beta)$ коэффициента полезного действия от коэффициента нагрузки β ; Коэффициент мощности нагрузки принять $\cos \varphi_2 = 0,75$. Построить векторную диаграмму трансформатора при нагрузке, составляющей 0,8 от номинальной мощности трансформатора $S_{\text{НОМ}}$ и $\cos \varphi_2 = 0,75$. Составить Т-образную схему замещения трансформатора.

РЕШЕНИЕ [1,5,12].

При соединениях обмоток по схемам Y/Δ , Y/Y , Δ/Y и Δ/Δ каждую фазу трансформатора можно рассматривать независимо как од-

нофазный трансформатор. Группа соединения обмоток трансформатора характеризуется угловым смещением линейных э.д.с. обмотки низкого напряжения (Н.Н.) по отношению к векторам линейных э.д.с. обмотки высокого напряжения (В.Н.). Группа указывается числом, стоящим в конце обозначения. В условии задачи это $Y/Y — 0$. Это число следует умножить на 30° для получения угла смещения в градусах. Угол смещения отсчитывается от вектора линейной э.д.с. Н.Н. по часовой стрелке до одноименного вектора линейной э.д.с. В.Н. В данной задаче угол равен нулю.

Определяем номинальный ток первичной обмотки:

$$I_{1НОМ} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3}U_{1НОМ}} = \frac{100 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 9,6 \text{ А.}$$

Определяем ток холостого хода и $\cos \varphi_0$:

$$I_0 = 0,07 I_{1НОМ} = 0,07 \cdot 9,6 = 0,67 \text{ А;}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{1НОМ} \cdot I_0} = \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,67} = 0,086; \quad \varphi_0 = 85\%.$$

Находим угол магнитных потерь: $\delta = 90^\circ - \varphi_0 = 90^\circ - 85^\circ = 5^\circ$.

Определяем сопротивления обмоток.

Сопротивления короткого замыкания:

$$Z_K = U_{K\phi} / I_{K\phi} = 0,055 \cdot 6000 / (\sqrt{3} \cdot 9,6) = 19,6 \text{ Ом;}$$

$$R_K = P_K / (3 \cdot I_K^2) = 2400 / (3 \cdot 9,6^2) = 8,7 \text{ Ом;}$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{19,6^2 - 8,7^2} = 17,9 \text{ Ом;}$$

первичной обмотки:

$$R_1 = R'_2 = R_K / 2 = 8,7 / 2 = 4,35 \text{ Ом;}$$

$$X_{d1} = X'_{d2} = X_K / 2 = 17,9 / 2 = 8,95 \text{ Ом;}$$

вторичной обмотки:

$$R_2 = R'_2 / n^2 = 4,35 / 225 = 0,0193 \text{ Ом;}$$

$$X_{d2} = X'_{d2} / n^2 = 8,95 / 225 = 0,0398 \text{ Ом;}$$

где $n = U_{1НОМ} / U_{20} = 6000 / 400 = 15$.

Определяем сопротивления намагничивающей цепи:

$$Z_0 = \frac{U_{1НОМ}}{I_0} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 0,67} = 5180 \text{ Ом;}$$

$$R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_0^2} = \frac{600}{3 \cdot 0,67^2} = 447 \text{ Ом};$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{5180^2 - 447^2} = 5160 \text{ Ом}.$$

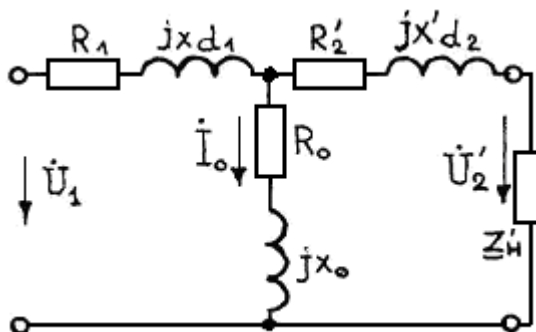


Рисунок 4.9 - Т-образная схема замещения трансформатора

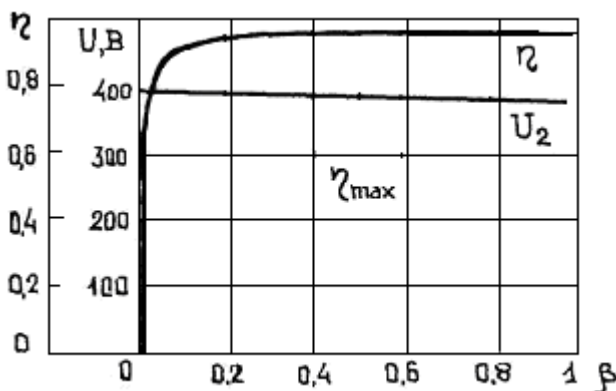


Рисунок 4.10 – Внешняя характеристика трансформатора $U_2 = f_1(\beta)$ и график зависимости $\eta = f_2(\beta)$

Для построения внешней характеристики $U_2 = f_1(\beta)$ находим потерю напряжения во вторичной обмотке трансформатора

$$\Delta U_2\% = \beta \cdot (u_a\% \cdot \cos \varphi_2 + u_p\% \cdot \sin \varphi_2), \quad (1)$$

где $u_a\%$, $u_p\%$ - соответственно активное и реактивное падения напряжений;

$$u_a\% = u_k\% \cdot \cos \varphi_k; \cos \varphi_k = R_k/Z_k; u_a\% = 5,5 \cdot 8,7/19,9 = 2,4\%;$$

$$u_p\% = \sqrt{(u_k\%)^2 - (u_a\%)^2} = \sqrt{5,5^2 - 2,4^2} = 4,95\%.$$

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора определяем по формуле

$$U_2 = U_{20} \cdot (100 - \Delta U_2\%) / 100. \quad (2)$$

Задавая различные значения β , по формулам (1) и (2) определяем напряжение U_2 (см. таблицу 4.1)

Для построения зависимости $\eta = f_2(\beta)$ расчет к.п.д. производим по формуле

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{ном} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}.$$

Результаты расчета сведены в таблицу 4.1. Полученные характеристики показаны на рисунке 4.10.

Таблица 4.1 - Результаты расчета

β	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\Delta U_2\%$	0,507	1,014	1,521	2,028	2,535	2,535	3,549	4,056	4,563	5,070
$U_2, В$	397,97	395,9	393,9	391,9	389,9	387,8	385,8	383,8	381,7	379,7
η	0,924	0,956	0,965	0,967	0,969	0,967	0,966	0,964	0,963	0,962

Определяем, при какой нагрузке трансформатор имеет максимальный к.п.д.:

$$\beta_{\max} = \sqrt{P_0 / P_k} = \sqrt{600 / 2400} = 0,5;$$

$$\eta_{\max} = 0,969.$$

Построение векторной диаграммы начнем с вектора фазного напряжения $U_{2\phi}$ значение которого для $\beta=0,80$ и $\cos \varphi_2=0,75$ равно

$$U_{2\phi} = 383,8 / \sqrt{3} = 222 \text{ В.}$$

Приведенное значение вторичного напряжения

$$\dot{U}'_{20} = U_{2\phi} \cdot n = 225 \cdot 15 = 3330 \text{ В.}$$

Вектор тока $I_{2\phi}$ отстает по фазе вектора $U_{2\phi}$ на заданный угол φ_2 и равен

$$I_2 = 0,8 \cdot I_{2ном} = 0,8 \cdot \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} U_{2ном}} = 0,8 \cdot \frac{100 \cdot 1000}{1,73 \cdot 400} = 115,6 \text{ А,}$$

$$I'_2 = I_2 / n = 115,6 / 15 = 7,72 \text{ А.}$$

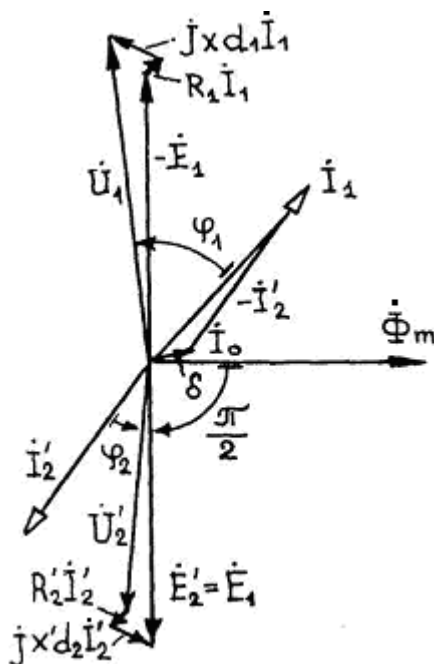


Рисунок 4.11 – Векторная диаграмма трансформатора

Падения напряжения во вторичной обмотке:

$$R_2' \cdot \dot{I}_2' = 4,35 \cdot 7,72 = 33,6 \text{ В};$$

$$X_{d2}' \cdot \dot{I}_2' = 8,95 \cdot 7,72 = 68,3 \text{ В}.$$

Электродвижущую силу $\dot{E}_2'$ находим из уравнения электрического состояния, составленного по второму закону Кирхгофа, для вторичной цепи:

$$\dot{E}_2' = \dot{U}_2' + R_2' \cdot \dot{I}_2' + jX_{d2}' \cdot \dot{I}_2'.$$

Вектор магнитного потока $\dot{\Phi}_m$ опережает вектор $\dot{E}_2'$ на 90° ; а ток холостого хода $\dot{I}_0$ опережает магнитный поток $\dot{\Phi}_m$ на угол потерь δ . Ток в первичной обмотке трансформатора $\dot{I}_1$ получаем из уравнения магнитодвижущих сил

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2'.$$

Вектор напряжения первичной обмотки трансформатора $\dot{U}_1$ определяем из уравнения электрического состояния, составленного по второму закону Кирхгофа для первичной цепи:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_1 + jX_{d1} \cdot \dot{I}_1.$$

Током холостого хода $\dot{I}_0$ можно пренебречь (так как он мал) и принять $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$ или определить $\dot{I}_1$ по диаграмме. Тогда падения напряжений в первичной обмотке будут:

$$R_1 I_1 = 4,35 \cdot 7,76 = 33,8 \text{ В};$$

$$X_{d1} I_1 = 8,95 \cdot 7,76 = 69,4 \text{ В}.$$

Векторная диаграмма трансформатора приведена на рисунке 4.11.

ЗАДАЧА 4.12. Определить необходимую мощность двигателя для привода механизма, работающего в повторно-кратковременном режиме, который задан нагрузочной диаграммой, изображенной на рисунке 4.12.

Двигатель должен развивать частоту вращения $n=720$ об/мин.

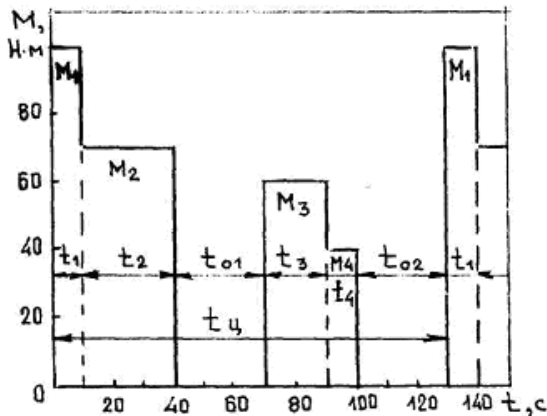


Рисунок 4.12 – Нагрузочная диаграмма к задаче 4.12

РЕШЕНИЕ [1,12].

Определяем эквивалентный момент за рабочее время:

$$M_{раб} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (M_k^2 \cdot t_k)}{t_p}} = \sqrt{\frac{100^2 \cdot 10 + 70^2 \cdot 30 + 60^2 \cdot 20 + 40^2 \cdot 10}{10 + 30 + 20 + 10}} = 69,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Определяем мощность, соответствующую эквивалентному моменту за рабочее время:

$$P_{раб} = M_{раб} \cdot n / 9550 = 69,2 \cdot 720 / 9550 = 5,2 \text{ кВт}.$$

Определяем относительную продолжительность включения:

$$ПВ = t_p / t_u = t_p / (t_p + t_0) = 70 / 130 = 0,54.$$

В каталогах для двигателей повторно-кратковременного режима номинальная мощность указывается для следующих стандартных значений относительной продолжительности включения ПВ: 0,15; 0,25; 0,4 и 0,6. В том случае, когда расчетная ПВ, определенная по нагрузочной диаграмме, отличается от стандартного значения, мощность двигателя пересчитывают по формуле

$$P_{раб} = P_{раб} \cdot \sqrt{ПВ_{раб} / ПВ_{ном}}.$$

$$\text{Для } ПВ_{ном} = 0,6 \text{ получаем } P_{раб} = 5,2 \cdot \sqrt{0,54 / 0,6} = 4,93 \text{ кВт}.$$

По данным каталога может быть подобран двигатель для расчетной мощности 5,0 кВт и ПВ_{ном} = 0,6.

ЗАДАЧА 4.13. Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором $P_{ном} = 10$ кВт, номинальное напряжение $U_{ном} = 380$ В, номинальная частота вращения ротора $n_{ном} = 1420$ об/мин, номинальный к.п.д. $\eta_{ном} = 0,84$ и номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном} = 0,85$. Кратность пускового тока $I_{пуск} / I_{ном} = 6,5$, а перегрузочная способность двигателя $\lambda = 1,8$. Частота сети $f = 50$ Гц. Число пар полюсов магнитного поля $p = 2$. Определить: потребляемую мощность; номинальный и максимальный (критический) вращающие моменты; пусковой ток; номинальное и критическое скольжения. Построить механические характеристики $M = f(S)$ и $\Omega = f(M)$.

РЕШЕНИЕ [1,12]

Потребляемая мощность $P_{1ном} = P_{ном} / \eta_{ном} = 10 / 0,84 = 11,9$ кВт.

Номинальный и максимальный моменты:

$$M_{max} = 9550 T_{max} / n_{max} = 9550 \cdot 10 / 1420 = 67,3 \text{ Нм};$$

$$M_{max} = \lambda M_{ном} = 1,8 \cdot 67,3 = 121 \text{ Нм}.$$

Номинальный и пусковой токи:

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном} \cos \varphi_{ном}} = \frac{11,9 \cdot 1000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,84} = 21,2 \text{ A};$$

$$I_{пуск} = 6,5 \cdot I_{ном} = 6,5 \cdot 21,2 = 138 \text{ A}.$$

$$\text{Синхронная скорость вращения } n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/мин}$$

Номинальное и критическое скольжения:

$$S_{ном} = (n_0 - n_{ном})/n_0 = (1500 - 1420)/1500 = 0,053;$$

$$S_{кр} = S_{ном} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,053 \left(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,175.$$

Механическая характеристика $M = f(S)$ строится по уравнению Клосса

$$M = \frac{2M_{кр}}{\left(S_{кр} / S + S / S_{кр} \right)} = \frac{242}{0,175 / S + S / 0,175}.$$

Задаваясь скольжением S от 0 до 1, подсчитываем вращающий момент. Скорость вращения ротора определяем из уравнения $\Omega = \Omega_0(1 - S)$, где Ω – угловая скорость вращения ротора, 1/с, Ω_0 – синхронная скорость, 1/с.

Расчетные данные приведены в таблице 4.2

Таблица 4.2 - Расчетные данные

S	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Ω , 1/с	142	126	110	94	79	63	48	31,6	15,8	0
M, Н·М	104	121	105	89	76	65	57	50,5	45,5	41,2

Характеристики, построенные по данным таблицы, изображены на рисунке 4.13 а,б.

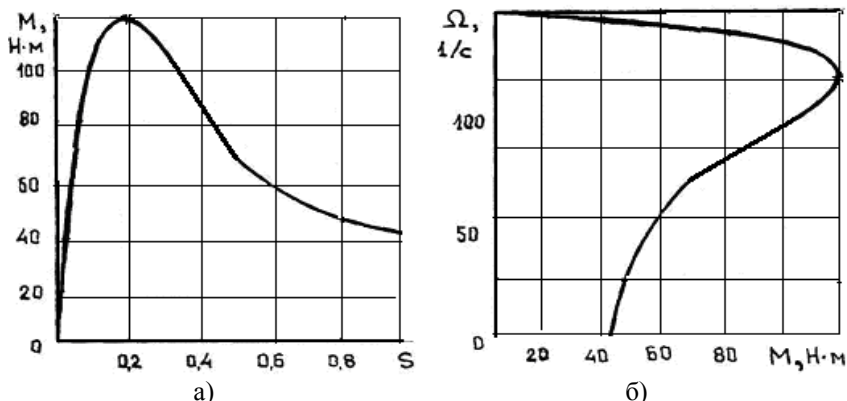


Рисунок 4.13 - Характеристики асинхронного двигателя к задаче 4.13

ЗАДАЧА 4.14. Двигатель параллельного возбуждения, присоединенный к сети с напряжением $U_{\text{ном}} = 220\text{В}$, потребляет при номинальной нагрузке ток $I_{\text{ном}} = 20,5\text{ А}$, при холостом ходе $I_0 = 2,35\text{ А}$. Сопротивление обмотки якоря $R_a = 0,75\text{ Ом}$, а в цепи возбуждения $R_B = 258\text{ Ом}$. Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1025\text{ об/мин}$.

Определить номинальную мощность двигателя (на валу), номинальный к.п.д., номинальный вращающий момент, пусковой ток при пуске двигателя без пускового реостата, сопротивление пускового реостата для условия $I_{\text{пуск}} = 2,5 I_{\text{ном}}$ и пусковой момент при пуске двигателя с реостатом.

Построить естественную механическую характеристику двигателя. При решении принять, что магнитные и механические потери не зависят от нагрузки.

РЕШЕНИЕ [1,12].

Номинальная мощность на валу двигателя

$$P_{\text{ном}} = P_{I_{\text{ном}}} - \Sigma \Delta P,$$

где $\Sigma \Delta P$ - потери в двигателе;

$P_{I_{\text{ном}}}$ - потребляемая мощность;

$$P_{I_{\text{ном}}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} = 220 \cdot 20,5 = 4510\text{Вт} = 4,51\text{ кВт}.$$

Для определения потерь в цепи якоря и цепи возбуждения надо знать ток в цепи якоря $I_{\text{ном}}$ и ток возбуждения I_B :

$$I_B = U_{\text{ном}} / R_B = 220 / 258 = 0,85\text{ А};$$

$$I_{\text{я.ном}} = I_{\text{ном}} - I_B = 20,5 - 0,85 = 19,65\text{ А}.$$

Потери в обмотке якоря и в цепи возбуждения:

$$\Delta P_{я.ном} = R_{я} \cdot I_{я.ном}^2 = 0,75 \cdot 19,65^2 = 290 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{\epsilon} = R_{\epsilon} \cdot I_{\epsilon}^2 = 258 \cdot 0,852 = 186 \text{ Вт}.$$

Магнитные и механические потери

$$\Delta P_{мех} + \Delta P_{м} = P_0 - \Delta P_{я0} - \Delta P_{\epsilon},$$

где $P_0 = U_{ном} I_0 = 220 \cdot 2,35 = 517 \text{ Вт}$; $\Delta P_{я0}$ - потери в обмотке якоря при холостом ходе двигателя:

$$\Delta P_{я0} = R_{я} (I_0 - I_{\epsilon})^2 = 0,75 (2,35 - 0,85)^2 = 1,7 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{мех} + \Delta P_{м} = 517 - 1,7 - 186 = 329,3 \text{ Вт};$$

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{я.ном} + \Delta P_{\epsilon} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{м} = 290 + 186 + 329,3 = 805,3 \text{ Вт};$$

$$P_{ном} = P_{1ном} - \Sigma \Delta P = 4510 - 805,3 = 3704,7 \text{ Вт} = 3,71 \text{ кВт}.$$

Номинальный к.п.д.

$$\eta_{ном} = P_{ном} / P_{1ном} \cdot 100\% = 3,71 / 4,50 \cdot 100\% = 82,2\%.$$

Номинальный вращающий момент

$$M_{ном} = 9550 P_{ном} / n_{ном} = 9550 \cdot 3,71 / 1025 = 34,6 \text{ Нм}.$$

Пусковой ток двигателя при пуске без реостата

$$I_{пуск} = U_{ном} / R_{я} = 220 / 0,75 = 293 \text{ А}.$$

Сопротивление пускового реостата определяется из равенства

$$I_{пуск} = 2,5 I_{я.ном} = U_{ном} / (R_{я} + R_p),$$

откуда

$$R_p = U_{ном} / (2,5 I_{я.ном}) - R_{я} = 220 / (2,5 \cdot 19,65) - 0,75 = 3,73 \text{ Ом}.$$

Определяем пусковой момент двигателя при пуске с реостатом. Известно, что вращающий момент двигателя определяется уравнением

$$M_{вр} = C_m \Phi I_{я}. \quad (*)$$

Для режима номинальной нагрузки выражение (*) принимает вид

$$M_{\text{ном}} = C_m \Phi I_{\text{я.ном}},$$

а для пускового режима

$$M_{\text{ном}} = C_m \Phi I_{\text{пуск}}.$$

Полагая магнитный поток в двигателе постоянным, возьмем отношение моментов

$$M_{\text{ном}}/M_{\text{пуск}} = I_{\text{я.ном}}/I_{\text{пуск}},$$

откуда

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{ном}} \cdot I_{\text{пуск}}/I_{\text{я.ном}} = 34,6 \cdot 2,5 = 86,5 \text{ Нм}.$$

Естественная механическая характеристика $\Omega = f(M)$ (прямая линия) строится по двум точкам:

1) В режиме холостого хода при $M=0$ частота вращения

$$n_0 = U_{\text{ном}}/(C_E \Phi_{\text{ном}}) = U_{\text{ном}}/E_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}} = 220/205 \cdot 1025 = 1100 \text{ об/мин},$$

где противо-Э.Д.С

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - R_{\text{я}} I_{\text{я.ном}} = 220 - 0,75 \cdot 19,65 = 205 \text{ В}.$$

Угловая скорость вращения якоря

$$\Omega_0 = \pi n_0 / 30 = 1151 \text{ с}^{-1};$$

2) При номинальной нагрузке $M = M_{\text{ном}} = 34,6 \text{ Нм}$, угловая скорость вращения якоря

$$\Omega_{\text{ном}} = \pi n_{\text{ном}} / 30 = 1071 \text{ с}^{-1}.$$

ЗАДАЧА. 4.15. Разработать преобразователь кода (ПК) по схеме дешифратор-шифратор с шифратором, выполненным по матричной диодной схеме, для преобразования входной функции $F_{\text{вх}}$ в соответствующую ей выходную $F_{\text{вых}}$ при условии, что входные функции заданы двоичным четырехразрядным кодом, выходные - двоичным пятиразрядным кодом, а диапазон изменения аргумента x составляет $(0...1)$ с дискретностью $0,1$. $F_{\text{вх}}(x) = \sin(\pi x/2)$; $F_{\text{вых}}(x) = -\cos(\pi x/2)$.

РЕШЕНИЕ [7,8].

Определяем дискретные значения входной функции при равномерной дискретизации с шагом $0,1$ при изменении x от 0 до 1 .

Полученные данные переводим в двоичный четырехразрядный код, для чего каждое из полученных дискретных значений функции умножаем на число $(2^4 - 1)$, результат округляем до ближайшего целого десятичного числа, которое и записываем в двоичном четырехразрядном коде. В таблице операция округления записана с помощью квадратных скобок. Ре-

зультаты сводим в таблицу 4.14.

Таблица 4.14 - Числовые значения

Характер операции	Дискретные значения преобразуемой входной функции										
x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\alpha = [\pi x/2]^\circ$	0	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90
$\sin \alpha$	0	0,16	0,31	0,45	0,59	0,71	0,81	0,89	0,95	$0,9\frac{9}{10}$	1,0
$(2^4-1)\sin \alpha$	0	2,5	4,65	6,75	8,85	10,7	12,2	13,4	14,3	$14,8\frac{1}{10}$	15
$[(2^4-1)\sin \alpha]$	0	3	5	7	9	11	12	13	14	15	15
Двоичный код $[(2^4-1)\sin \alpha]$	0000	0011	0110	0111	1001	1011	1100	1101	1110	1111	1111

Определяем дискретные значения выходной функции в виде двоичного пятиразрядного кода при тех же значениях и по той же методике, Результаты указаны в таблице 4.15.

Таблица 4.15 - Числовые значения

Характер операции	Дискретные значения преобразуемой выходной функции										
x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\alpha = [\pi x/2]^\circ$	0	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90
$\cos \alpha$	1,0	0,98	0,95	0,88	0,80	0,71	0,57	0,44	0,29	0,14	0
$(2^5-1)\cos \alpha$	31	30,4	29,7	27,4	24,8	22	17,7	13,7	9,0	4,3	0
$[(2^5-1)\cos \alpha]$	31	30	30	27	25	22	18	14	9	4	0
Двоичный код $[(2^5-1)\cos \alpha]$	11111	11110	11110	11011	11001	10110	10010	01110	01001	00100	00000

Строим схему ПК. Для этого используем дешифратор 4×16 , выходные шины 0...15 которого с помощью диодов соединены с пятью выходными шинами шифратора в соответствии с полученными результатами -

кодами входной и выходной функций. Двоичный четырехразрядный код входной функции на каждом из наборов определяет номер выходной шины дешифратора. Соответствующий ему двоичный пятиразрядный код определяет узлы соединения этой выходной шины с соответствующей разрядной выходной шиной шифратора. Соединения выходной шины дешифратора и выходных шин шифратора осуществляется с помощью диодов только в тех разрядах, где код выходного пятиразрядного двоичного числа равен единице. Схема ПК для рассматриваемого примера приведена на рисунке 4.14.

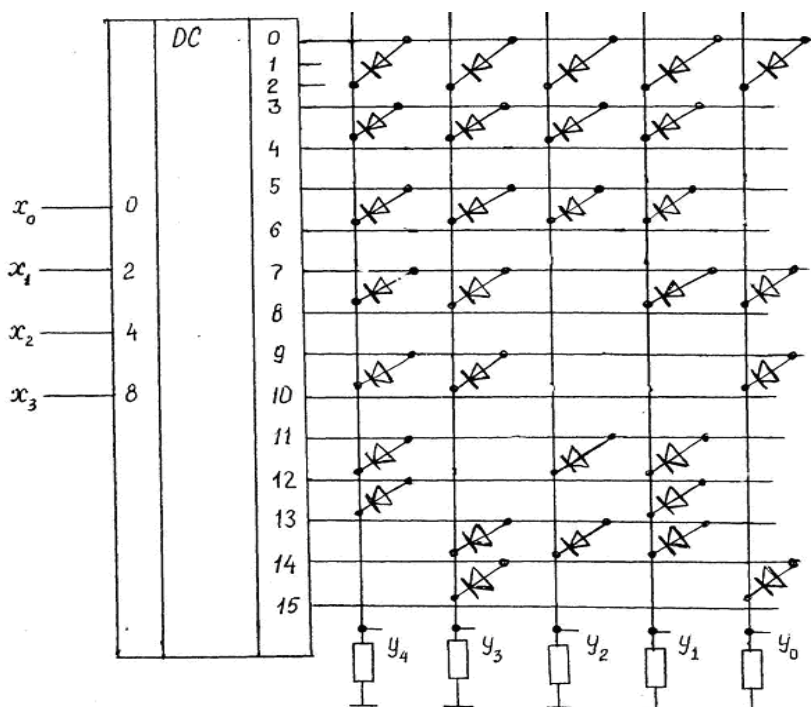


Рисунок 4.15 – Схема ПК к задаче 4.14

В случае, если одному и тому же входному коду соответствуют различные выходные коды, что объясняется погрешностями, вызванными дискретизацией непрерывной функции конечным числом ее дискретных значений (например, два последних столбца таблиц 4.14 и 4.15), следует взять одно из значений выходного кода.

ЗАДАЧА 4.16. Разработать на основе микросхем К155ИЕ6 и К155ИЕ7 делитель частоты последовательности импульсов, работающий с двоичными и двоично-десятичными кодами, с коэффициентом деления $K_{\text{дел}} = 3785$, построить и нарисовать схему делителя частоты и определить максимальную частоту поступления входных импульсов f_{max} .

РЕШЕНИЕ [6,7,8].

Определяем необходимое число разрядов двоичного счетчика n для построения делителя с заданным $K_{\text{дел}}$:

$$n = [\log_2 K_{\text{дел}}] = 12,$$

где квадратные скобки означают округленное до ближайшего целого десятичное число.

Определяем число корпусов микросхем, необходимых для построения делителя

$$N = n/m = 3,$$

где $m=4$ - число разрядов одной микросхемы.

Определяем максимальный коэффициент деления счетчика с числом разрядов n

$$K_{\text{дел max}} = 2^n = 4096.$$

Определяем число, которым необходимо дополнить счетчик-делитель для получения заданного коэффициента деления

$$M = K_{\text{дел max}} - K_{\text{дел}} = 4096 - 3785 = 311.$$

Переводим число M в двоичный код

$$M_{\text{дв}} = 000100001111.$$

Рисуем схему делителя, соединяя последовательно N микросхем К155ИЕ7 и подавая на параллельные входы число M . Входы управления S микросхем подключаем через инвертор к входу переполнения старшего разряда.

Число $M_{\text{дв}}$ и надо устанавливать на входах микросхем при реализации делителя (рисунок 4.15).

При выполнении расчетов можно использовать современные вычислительные программные пакеты, как в следующей задаче 4.17.

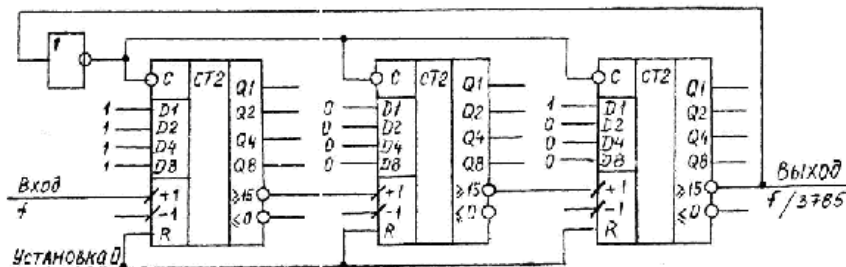


Рисунок 4.15 – Схема делителя

ЗАДАЧА 4.17. Определить напряжение на выходе диодного ограничителя (рисунок 4.16) при действии на входе синусоидального напряжения. Диод считать идеальным. Изобразить временные диаграммы напряжения на диоде, тока диода и выходного напряжения.

$$U_m := 70 \text{ В}, \quad E_{1\text{см}} := 20 \text{ В}, \quad E_{2\text{см}} := 40 \text{ В}; \\ R_H := 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}, \quad R_{BH} := 0.25 \cdot 10^3 \text{ Ом}, \quad f := 50 \text{ Гц}.$$

РЕШЕНИЕ [7,8].

Решим задачу с использованием интегрированной среды MathCAD.

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f, \quad U_{вх} = u(t) := U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \text{ (рисунок 4.17)}.$$

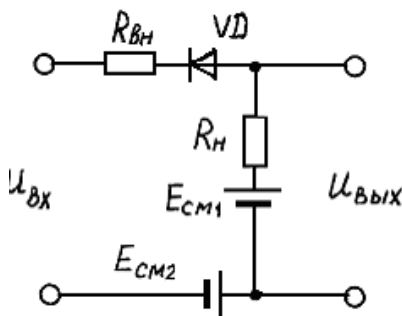


Рисунок 4.16 – Схема диодного ограничителя

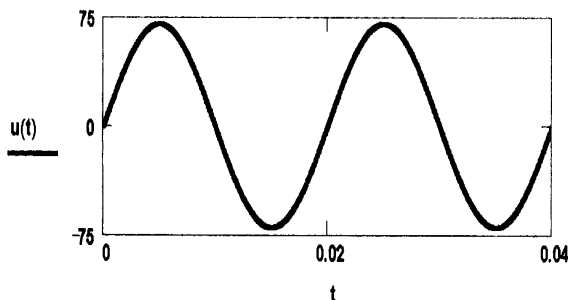


Рисунок 4.17 – Входное напряжение диодного ограничителя

Напряжение на диоде $u_d(t)$ определим по закону Кирхгофа, учитывая идеальность вольт-амперной характеристики диода (рисунок 4.18).

$$u_{dd}(t) := u(t) + E1_{cm} + E2_{cm} \quad u_d(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } u_{dd}(t) \geq 0 \\ u_{dd}(t) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$u_{ddmax} := -(U_m + E1_{cm} + E2_{cm})$$

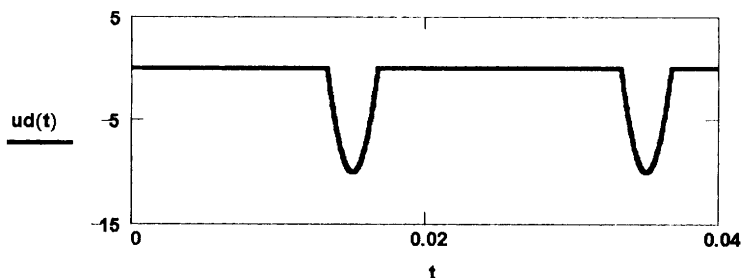


Рисунок 4.18 – Напряжение на диоде

Максимальное обратное напряжение на диоде
 $u_{ddmax} = -130 \text{ В}$.

Ток, протекающий через диод, принимает ненулевые значения при неотрицательном напряжении на диоде (рисунок 4.19)

$$i_d(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } u_{dd}(t) < 0 \\ \left(\frac{u_{dd}(t)}{R_H + R_{BH}} \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Максимальное значение тока через диод

$$id_{max} := -u_{ddmax}/(R_H + R_{BH}).$$

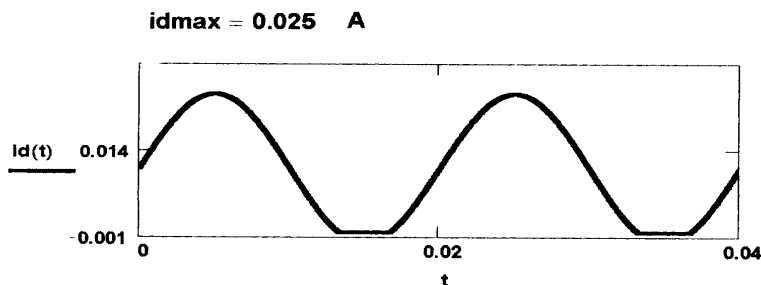


Рисунок 4.19 – График тока через диод

Напряжение на выходе диодного ограничителя, по второму закону Кирхгофа

$$u_H(t) := E_{1cm} - id(t) \cdot R_H \text{ (рисунок 4.20)}$$

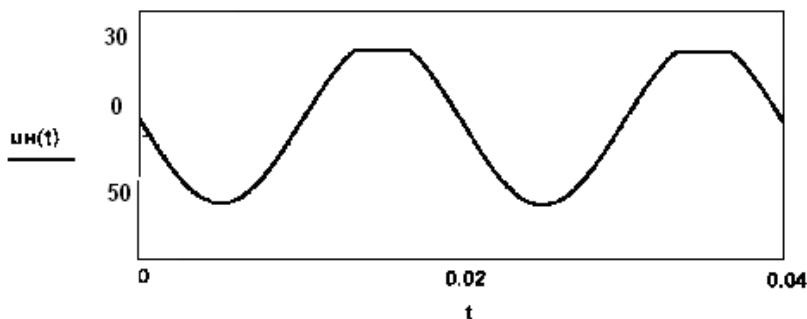


Рисунок 4.20 - Напряжение на выходе диодного ограничителя

Максимальное отрицательное напряжение на выходе диодного ограничителя

$$U_{max} := E_{1cm} - id_{max} \cdot R_H;$$

$$U_{max} = 20 - 0,025 \cdot 5 \cdot 10^3 = -55 \text{ В.}$$

ЗАДАЧА 4.18. Произвести расчет одноконтурного двухфазного полупроводникового выпрямителя, работающего на **RC**-нагрузку.

При расчете принять допущения: индуктивность рассеяния обмоток трансформатора **L_S = 0**; внутреннее сопротивление вентиля **R_i = 0**.

РЕШЕНИЕ [13].

В соответствии с методикой расчета [5] определяется:

1. Сопротивление нагрузки схемы выпрямления $R_2 = U_0 / I_0$.
2. Полезная мощность в нагрузке $P_0 = I_0 \cdot U_0$.
3. Активное сопротивление фазной обмотки трансформатора $R_a = v \cdot R_2$,
где v определяется по графику, изображенному на рисунке 5.21.
4. Сопротивление фазы выпрямителя $R = R_a + R_i$, где R_i - внутреннее сопротивление вентиля.
5. Расчетный коэффициент

$$A = \frac{\pi \cdot R}{m \cdot R_2},$$

где m - фазность схемы выпрямления; $m = 2$.

6. Угол отсечки Θ находят по графику (рисунок 4.23).
7. Расчетные коэффициенты B, D, F , зависящие от A , определяют по соответствующим графикам (рисунки 4.24, 4.25, 4.26).
8. Действующее значение напряжения вторичной обмотки силового трансформатора $U_2 = B \cdot U_0$.

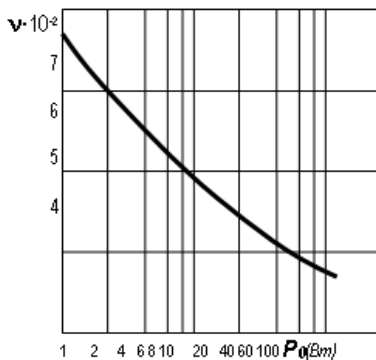


Рисунок 4.21

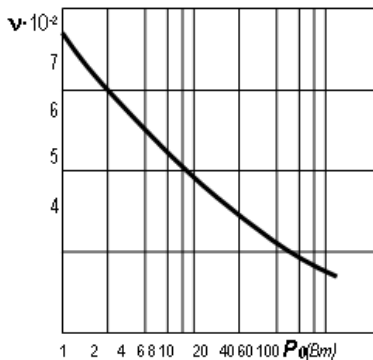


Рисунок 4.22

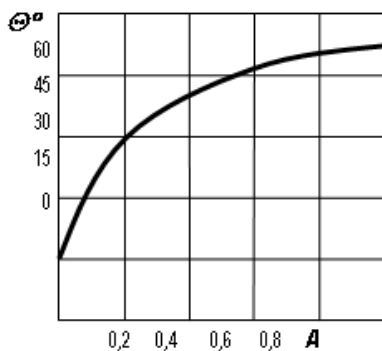


Рисунок 4.23

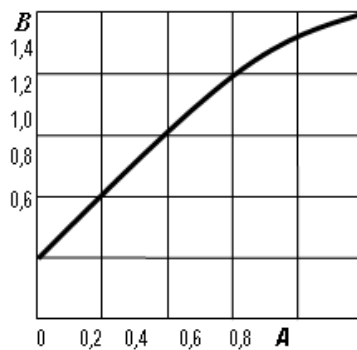


Рисунок 4.24

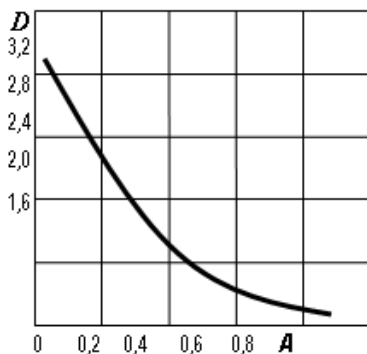


Рисунок 4.25

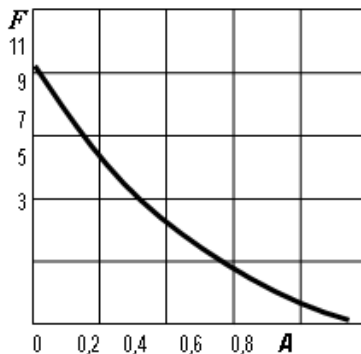


Рисунок 4.26

9. Амплитуда обратного напряжения на вентиле

$$U_{OBR.max} = U_{2max} + U_0 = \sqrt{2}U_2 + U_0.$$

10. Амплитуда тока через вентиль

$$I_{B.max} = F \cdot \frac{I_0}{m} < I_{B.max доп}.$$

11. По данным значениям $I_{B.max}$ и $U_{OBR.max}$ выбирается тип вентиля из таблицы 4.16

Таблица 4.16 – Параметры выпрямительных диодов

Параметры диода	Тип диода	
	КД 105 Б	КД 208 А
Наибольшее значение выпрямленного тока	300 мА	5 А
Наибольшее падение напряжения в прямом направлении	1,0 В	0,9 В
Обратное пробивное напряжение	400 В	50 В

12. Действующее значение тока, протекающего через вентиль и вторичную обмотку трансформатора

$$I_B = I_2 = D \cdot \frac{I_0}{m}.$$

13. Коэффициент трансформации силового трансформатора

$$\eta = U_2 / U_1.$$

14. Ток первичной обмотки трансформатора

$$I_{10} = \frac{I_2 \cdot n}{\sqrt{2}}.$$

15. Ток первичной обмотки трансформатора с учетом тока холостого хода

$$I_1 \approx 1,4 I_{10}.$$

16. Расчетная мощность первичной обмотки трансформатора

$$P_1 \approx \sqrt{2} P_0$$

17. Коэффициент использования первичной обмотки:

$$K_1 = P_0 / P_1.$$

18. Расчетная мощность вторичной фазной обмотки трансформатора

$$P_2 = 2 P_0.$$

19. Коэффициент использования вторичной обмотки

$$K_2 = P_0 / P_2.$$

20. Габаритная мощность силового трансформатора

$$P_{Tp} = (P_1 + P_2) / 2.$$

21. КПД выпрямителя $\eta = \eta_{Tp} \cdot \eta_B$,

где $\eta_B \approx 1$; η_{Tp} – определяется по графику рисунок 4.22.

22. Емкость, включаемая параллельно резистору R_2 .

$$C \approx \frac{4,45}{K_{\text{ПС}} \cdot m \omega \cdot R_1}, \text{ мкФ},$$

где $m = 2$; $\omega = 2\pi f$; $K_{\text{ПС}}$ – требуемый коэффициент пульсаций, задаваемый при расчете; размерность R_2 – [кОм],

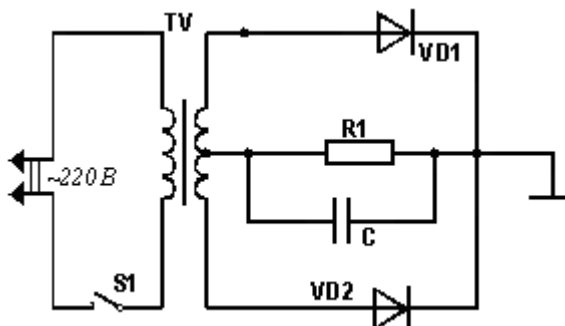


Рисунок 4.27 – Схема выпрямления

23. Коэффициент фильтрации C -фильтра $K_{\phi C} = \frac{K_{\text{П}}}{K_{\text{ПС}}}$,

где $K_{\text{П}}$ – коэффициент пульсации схемы выпрямления (рисунок 4.27) при работе с активной нагрузкой; для $m = 2$, $K_{\text{П}} = 0,67$.

ЗАДАЧА 4.19. Произвести расчет мультивибратора на ОУ с интегрирующим звеном в цепи ООС. Определить период и скважность колебаний U_1 . Нарисовать временные диаграммы напряжений U_1 , U_2 . Схема мультивибратора показана на рисунке 5.28.

РЕШЕНИЕ [10].

Мультивибраторы предназначены для генерирования импульсов прямоугольной формы. Мультивибратор на основе ОУ содержит цепи положительной (ПОС) и отрицательной (ООС) обратных связей. Первая обеспечивает лавинообразный переход выходного напряжения ОУ от напряжения насыщения одной полярности к напряжению насыщения другой полярности, а вторая ограничивает время пребывания ОУ в состоянии насыщения выходного напряжения [10].

Мультивибратор с активным интегратором в цепи ООС показан на рисунке 4.28.

Данный мультивибратор одновременно генерирует колебания пря-

моугольной и пилообразной формы. Первый каскад схемы, выполненный на $DA1$, представляет собой инвертирующий интегратор, а второй каскад, выполненный на $DA2$ — неинвертирующий триггер Шмитта (ТШ). Мультивибратор имеет два выхода. С выхода ТШ снимают прямоугольные импульсы напряжения U_1 , а с выхода интегратора — напряжение пилообразной формы U_2 .

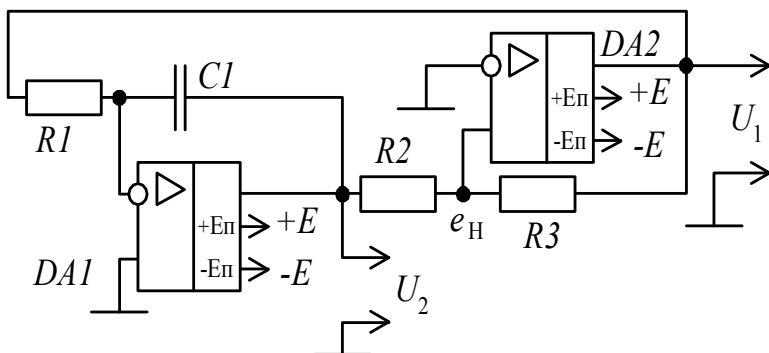


Рисунок 4.28 — Мультивибратор с интегратором в цепи ООС

Временные диаграммы, иллюстрирующие работу мультивибратора, показаны на рисунке 4.29. В течение каждого полупериода колебаний на вход интегратора поступает выходное напряжение триггера Шмитта U_1 , которое остается неизменным в течение полупериода колебаний, поэтому выходное напряжение интегратора U_2 изменяется во времени линейно. U_2 изменяется во времени линейно. Направление изменения U_2 определяется полярностью напряжения U_1 . При $U_1 = U_{-M} < 0$ напряжение U_2 увеличивается и когда оно достигает порога срабатывания триггера $U_{П2}$, напряжение U_1 скачком изменяется на $U_{+M} > 0$. Вследствие этого изменяется порог срабатывания ТШ с $U_{П2}$ на $U_{П1}$, а выходное напряжение интегратора U_2 линейно уменьшается. Вследствие этого изменяется порог срабатывания ТШ с $U_{П2}$ на $U_{П1}$, а выходное напряжение интегратора U_2 линейно уменьшается.

При достижении U_2 порога срабатывания $U_{П1}$ напряжение U_1 скачком изменяется с U_{+M} на U_{-M} , вновь устанавливается пороговое напряжение $U_{П2}$ и процесс повторяется. Размах пилообразного напряжения $\Delta U_2 = U_{П2} - U_{П1}$ определяется пороговыми напряжениями ТШ:

$$U_{\Pi 1} = U_{-M} R_2 / R_3,$$

$$U_{\Pi 2} = U_{+M} R_2 / R_3.$$

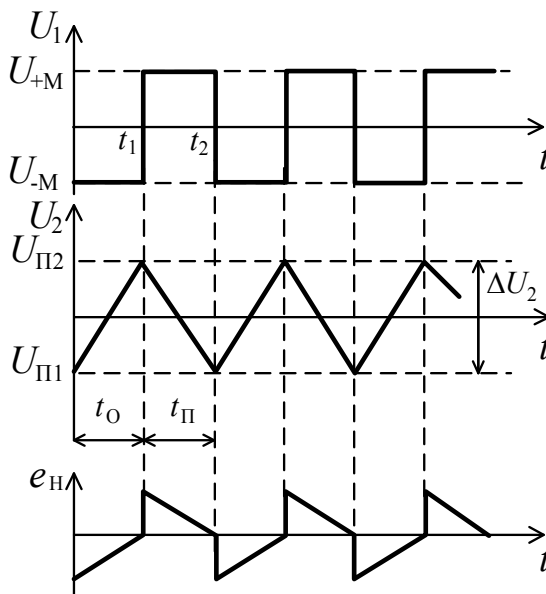


Рисунок 4.29— Временные диаграммы напряжений мультивибратора с интегратором

Для определения длительности временного интервала $t_0=t_1$ составляем уравнение

$$-\frac{1}{\tau} \int_0^{t_1} U_{-M} dt = U_{\Pi 2} - U_{\Pi 1}$$

или

$$\frac{t_1}{\tau} U_{-M} = \frac{R_2}{R_3} (U_{-M} - U_{+M}),$$

из которого находим

$$t_0 = t_1 = \tau \frac{R_2(U_{-M} - U_{+M})}{R_3 U_{-M}} = \tau \frac{R_2(A-1)}{R_3 A},$$

где $\tau = R_1 C_1$ - постоянная времени интегратора, $A = U_{-M}/U_{+M}$ - отношение напряжений насыщения ОУ.

Формулу для расчета длительности интервала $t_{II} = t_2 - t_1$ получаем взаимной заменой напряжений насыщения U_{+M} и U_{-M} :

$$t_{II} = \tau \frac{R_2(U_{+M} - U_{-M})}{R_3 U_{+M}} = \tau \frac{R_2(1-A)}{R_3}.$$

Определяем период колебаний:

$$T = t_0 + t_{II} = -\tau \frac{R_2(A-1)^2}{R_3 A}.$$

Скважность колебаний:

$$Q = \frac{T}{t_{II}}.$$

При $A = -1$, что соответствует $U_{+M} = -U_{-M} = U_{\pm M}$, получаем:

$$T = 4\tau \frac{R_2}{R_3}; \quad Q = \frac{T}{t_1} = 2; \quad \Delta U_2 = 2U_{\pm M} \frac{R_2}{R_3}.$$

Из соотношения для ΔU_2 следует, что для возникновения автоколебаний необходимо выполнить условие $R_2 < R_3$. При этом изменение постоянной времени интегратора влияет только на период колебаний, а изменение отношения R_2/R_3 влияет как на период колебаний, так и на размах пилообразного напряжения U_2 .

5. ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ

Электрические аппараты.

Привести основные сведения о работе одного из указанных видов электромеханических устройств; назначение, схематичное изображение, принцип действия, свойства, область применения.

1. Электрические контакты
2. Электрические реле
3. Реле защиты;
4. Реле времени;
5. Тепловые реле;

6. Реле максимального тока;
7. Реле минимального напряжения;
8. Реле управления и автоматики.
9. Контакторы
10. Автоматические выключатели
11. Магнитные пускатели
12. Автоматический воздушный выключатели
13. Трехфазные трансформаторы
14. Измерительные трансформаторы
15. Автотрансформаторы

Электроизмерительные приборы и электрические измерения.

Дать описание метода измерения, схему прибора и пояснить работу устройства.

1. Погрешности измерений. Обработка и представление результатов измерений
2. Магнитоэлектрические измерительные приборы
3. Электромагнитные измерительные приборы
4. Электродинамические и ферродинамические измерительные приборы
5. Индукционные измерительные приборы
6. Электростатические измерительные приборы
7. Приборы прямого преобразования
8. Светолучевой осциллограф
9. Электронно-лучевой осциллограф
10. Электронные вольтметры
11. Цифровые вольтметры
12. Измерение тока и напряжения
13. Измерение мощности
14. Измерение электрического сопротивления мостовым методом
15. Измерение электрического сопротивления компенсационным методом
16. Измерение индуктивности и емкости
17. Общие сведения об измерении неэлектрических величин
18. Основные сведения об измерительных информационных системах

Современные цифровые интегральные микросхемы.

1. Разновидности функциональных схем.
2. Параметры микросхем.

3. Универсальные (стандартные) серии ТТЛ.
4. Интегральные схемы с МОП-транзисторами. Базовые элементы.
5. Интегральные усилители постоянного тока

Комбинационные устройства.

1. Мультиплексоры
2. Дешифраторы
3. Арифметические устройства

Последовательностные устройства.

1. Триггеры
2. Счетчики и делители
3. Регистры

Микропроцессоры.

1. Программное обеспечение микропроцессоров
2. Запоминающие устройства микропроцессорных систем
3. Обмен информацией в микропроцессорных системах
4. Архитектура микропроцессоров
5. Применение микропроцессорных систем

6. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНАМ И ЗАЧЕТАМ

1. Источники электроэнергии: идеальные источники тока и напряжения.
2. Топологические понятия теории электрических цепей.
3. Законы Кирхгофа и их применение для описания электрического состояния цепей постоянного тока.
4. Расчет цепей методом контурных токов.
5. Расчет цепей методом узловых потенциалов.
6. Основные характеристики синусоидального тока.
7. Изображение синусоидальных функций времени в комплексной форме.
8. Резистивный элемент в цепи синусоидального тока.
9. Емкостной элемент в цепи синусоидального тока.
10. Индуктивный элемент в цепи синусоидального тока.
11. Последовательное соединение элементов в цепи синусоидального тока.
12. Резонанс напряжений.
13. Параллельное соединение элементов в цепи синусоидального тока.
14. Резонанс токов.

15. Мощность цепи синусоидального тока.
16. Общие сведения о четырехполюсниках.
17. Электрические цепи с взаимной индуктивностью.
18. Элементы трехфазных цепей.
19. Трехпроводная и четырехпроводная системы.
20. Соединение элементов трехфазной цепи треугольником.
21. Соединение элементов трехфазной цепи звездой.
22. Мощность трехфазных цепей.
23. Переходные процессы в линейных электрических цепях.
24. Законы коммутации.
25. Переходный процесс в RC-цепи.
26. Переходный процесс в RL-цепи.
27. Алгоритм расчета переходных процессов классическим методом
28. Алгоритм расчета переходных процессов операторным методом
29. Показатели качества переходных процессов
30. Зависимость вида переходного процесса в схеме с последовательным соединением R, L, C от корней характеристического уравнения
31. Передаточная функция цепи и ее свойства
32. Типовые сигналы для определения динамических свойств схем
33. Разложение периодических несинусоидальных электрических величин в ряд Фурье.
34. Представление о спектральном составе несинусоидальной кривой
35. Параметры периодических несинусоидальных электрических величин.
36. Общая характеристика магнитных цепей постоянного тока.
37. Особенности электромагнитных процессов в магнитных цепях переменного тока. Электрические фильтры.
38. Избирательные цепи.
39. Дифференцирующие и интегрирующие цепи.
40. Устройство, принцип действия и назначение трансформаторов.
41. Нагрузочная характеристика трансформатора
42. Потери энергии и к.п.д. трехфазного трансформатора
43. Уравнения электрического состояния первичной и вторичной обмоток трансформатора. Векторная диаграмма.
44. Измерительные трансформаторы тока и напряжения.
45. Автотрансформаторы.
46. Режимы работы электрической машины постоянного тока.
47. Способы возбуждения генераторов постоянного тока.
48. Общие свойства и характеристики электродвигателей постоянного тока.
49. Конструктивные элементы двигателя постоянного тока

50. Принцип действия двигателя постоянного тока
51. Схема замещения двигателя постоянного тока параллельного, последовательного и независимого возбуждения
52. Способы регулирования скорости двигателей постоянного тока
53. Виды потерь в двигателях постоянного тока
54. Естественная и реостатная механические характеристики двигателя постоянного тока
55. Принцип действия и условное обозначение асинхронного двигателя
56. Конструкции роторов асинхронных двигателей
57. Потери энергии и к.п.д. в асинхронном двигателе
58. Способы регулирования скорости асинхронного двигателя
59. Механическая характеристика асинхронного двигателя
60. Принцип действия и условное обозначение синхронных машин
61. Виды пуска синхронных машин
62. Вид механической характеристики синхронной машины
63. Классификация режимов работы электродвигателей
64. Устройство синхронной машины.
65. Нелинейные электрические цепи.
66. . Классификация полупроводниковых резисторов
67. Условное обозначение, вольтамперная характеристика и принцип действия терморезисторов, тензорезисторов, фоторезисторов
68. Классификация полупроводниковых диодов
69. Условное обозначение, вольтамперная характеристика принцип действия туннельного диода, стабилитрона, фотодиода, светодиода, фотоэлемента
70. Статическое и дифференциальное сопротивление.
71. Схема замещения биполярного транзистора. Физический смысл h – параметров.
72. Структура и графические характеристики биполярных транзисторов
73. Структура и графические характеристики полевых транзисторов.
74. Условное обозначение, интегральное исполнение полупроводниковых транзисторов
75. Параметры и схема замещения полевых транзисторов
76. Выпрямители. Назначение, основные характеристики, классификация.
77. Однофазные и трехфазные выпрямители.
78. Управляемые выпрямители на тиристорах.
79. Параметрические стабилизаторы напряжения на стабилитронах.
80. Преобразователь синусоидального напряжения в трапецеидальное

с использованием двухстороннего стабилитрона.

81. Усилители напряжения. Общие сведения, классификация, частотная и амплитудная характеристики.

82. Усилительный каскад на транзисторе. Схема с общим эмиттером.

83. Обратные связи в усилителях. Положительная и отрицательная обратная связь.

84. Операционные усилители.

85. Температурная стабилизация усилительного каскада с общим эмиттером.

86. Схемы усилителей с общей базой и общим коллектором.

87. Усилители постоянного тока (УПТ).

88. Генераторы гармонических колебаний. Классификация, общие сведения, область применения. Условия самовозбуждения автогенераторов.

89. LC-автогенераторы. Схема, принцип работы.

90. RC-автогенераторы. Схема, принцип работы.

91. Структурная схема электронного усилителя.

92. Структурная схема источника электропитания электронного прибора.

93. Электрические импульсы и их параметры.

94. Ограничители электрических сигналов.

95. Электронные ключевые схемы на диодах и транзисторах,

96. Мультивибраторы.

97. Триггеры.

98. Обозначение, таблица истинности, схемная реализация основных логических операций

99. Классификация логических элементов

100. Триггеры в интегральном исполнении.

101. Счетчики.

102. Регистры.

103. Шифраторы и дешифраторы.

104. Сумматоры.

105. Микропроцессоры (МП) и микроЭВМ: основные понятия. Архитектура микропроцессоров

106. Аппаратное обеспечение микропроцессоров

107. Периферийное оборудование микропроцессоров

108. Организация основных процессов в микропроцессорах

109. Практическое применение микропроцессоров

7. ПРИМЕРЫ ЗАДАЧ ДЛЯ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ БИЛЕТОВ

1. Определить показатели качества переходного процесса по графику переходной функции.

2. Определить входное сопротивление транзистора по входной характеристике биполярного транзистора в рабочей точке $I_{б0}$, $U_{бэ0}$.

3. Определить выходную проводимость транзистора по семейству выходных характеристик биполярного транзистора в рабочей точке $I_{к0}$, $U_{кэ0}$.

4. Рассчитать и построить для биполярного транзистора с известным семейством выходных характеристик нагрузочную прямую.

5. Рассчитать и построить механическую характеристику асинхронного двигателя с к.з. ротором на основе паспортных данных.

6. Рассчитать по механической характеристике асинхронного двигателя перегрузочную способность, синхронную скорость и номинальную мощность двигателя.

7. Определить синхронную скорость, номинальную скорость и максимальный момент двигателя типа А-051-6, работающего на промышленной частоте, если известны: номинальное скольжение $S_{ном}$, перегрузочная способность λ_{max} и номинальная мощность $P_{ном}$.

8. Рассчитать по механической характеристике двигателя пусковой момент, максимальную скорость и мощность двигателя.

9. Двигатель параллельного возбуждения включен в сеть с известным напряжением U потребляет мощность $P_{ном}$. Определить потребляемый двигателем ток и сопротивление цепи якоря $R_{я}$ при известном отношении $R_{в}/R_{я}$.

10. Двигатель параллельного возбуждения включен в сеть с известным напряжением U . Определить потребляемый двигателем ток и сопротивление обмотки возбуждения при номинальной мощности двигателя $P_{ном}$ и сопротивлении цепи якоря $R_{я}$.

11. Рассчитать длительность цикла, время разгона и продолжительность включения двигателя по заданной тахограмме.

12. Обосновать и изобразить схему включения в сеть ваттметра с помощью трансформатора тока и трансформатора напряжения.

13. Рассчитать переходный процесс в цепи и построить его график.

14. Определить корни характеристического уравнения схемы. Дать оценку характеру переходного процесса.
15. Определить оригинал тока, если его операторное изображение имеет заданный вид.
16. Определить независимые начальные условия и обосновать операторную схему замещения цепи.
17. Дать оценку изменению графика переходного тока в предложенной цепи при изменении параметров одного из элементов цепи.
18. Задана комбинация на входах логической схемы. Определить значение выхода.
19. Изобразить схему сумматора на операционном усилителе. Определить коэффициент обратной связи и напряжение на выходе схемы.
20. Проанализировать результаты работы логических схем.
21. Определить и построить временные диаграммы напряжения на резистивной нагрузке и на диоде в однофазной однополупериодной схеме выпрямления.
22. Построить временные диаграммы напряжения на резистивной нагрузке и на диоде в однофазной двухполупериодной мостовой схеме выпрямления.
23. Определить передаточную функцию цепи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электротехника. Учеб. для неэлектротехн. специальностей. вузов/Под ред. В.Г.Герасимова.- М.: Высш.шк., 2000.-480с.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 440 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи/ Л.А. Бессонов.– М.: Изд-во «Гардарики», 2002, –640 с.
4. Теоретические основы электротехники/ К.С. Демирчан, Л.Р.Нейман, Н.В.Коровкин и др. – С.–Пб.: Изд-во «Питер», 2003. – Т.1-464 с.
5. Морозов А.Г. Электротехника, электроника и импульсная техника.- М.: Высш.шк., 1987.-448с.
6. Основы промышленной электроники /Под ред. В.Т.Герасимова. - М.: Высш.шк., 1986.-320с.
7. Скаржепа В.А. Электроника и микросхемотехника: Сб.задач /В.А.Скаржепа, В.И.Сенько; Под общ.ред. А.А.Краснопрошиной:- К.Выща шк. 1989. - 232с.
8. Скаржепа В.А. Электроника и микросхемотехника. ч.1. Электронные устройства информационной автоматики/ В.А.Скаржепа., А.Н.

Луценко; Под ред. А.А.Краснопрошиной. - К: Выща шк. 1989 -431с.

9. Шебес М.Р. Сборник задач по теории линейных электрических цепей.-М.: Высшая школа, 1990.-530 с.

10. Ветров И.Л. Электронные устройства на аналоговых и аналого-цифровых интегральных схемах: Учеб. пособие/И. Л. Ветров. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. — 282 с.

11. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. – М.: СОЛОН – Пресс, 2004.- 800 с.

12. Сборник задач по электротехнике и основам электроники/В.Г. Герасимов, Х.Э. Зайдель, В.В. Коген-Далин и др. Под ред. В.Г. Герасимова.- М.: Высшая школа, 1987. – 288 с.

13. Краус Л.А. Проектирование стабилизированных источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры / Л.А. Краус, Г.В. Гейман, М.М. Лапиров-Скобло. – М.: Энергия, 1995. – 288с.

Заказ № _____ от ____ . ____ .06. Тираж _____ экз.

Издательство СевНТУ