

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»  
(СПбГУТ)**

**АРХАНГЕЛЬСКИЙ КОЛЛЕДЖ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ (ФИЛИАЛ) СПбГУТ  
(АКТ (Ф) СПбГУТ)**

**УТВЕРЖДАЮ**

Зам. директора по учебной работе

\_\_\_\_\_ Н.В. Калинина

\_\_\_\_\_ 2018 г.

**Составил  
О.М. Попова  
И.А. Миненко**

## **ОП.01 ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Программа, методические указания по изучению  
дисциплины, контрольное задание для студентов  
заочной формы обучения

по специальности:

11.02.10 Радиосвязь, радиовещание и телевидение

Архангельск 2018

О.М. Попова, И.А. Миненко. ОП.01 Теория электрических цепей. Программа, методические указания по изучению дисциплины, контрольное задание.- Архангельск: АКТ (ф) СПбГУТ, 2018.

Рассмотрены и одобрены на заседании цикловой комиссии Почтовой связи и общепрофессиональных дисциплин Архангельского колледжа телекоммуникаций (филиал) СПбГУТ им. проф. М.А.Бонч-Бруевича.

Рецензенты программы:

Ведерников Ю.Г. – преподаватель цикловой комиссии «Радиосвязь, радиовещание и телевидение, эксплуатация средств связи» АКТ(ф) СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Прошин А.В. ведущий инженер – электросвязи УЭ №1 МЦТЭТ Архангельского филиала ОАО «Ростелеком».

© АКТ (ф) СПбГУТ

## СОДЕРЖАНИЕ

Пояснительная записка	4
1. Учебная карта дисциплины ОП.01 Теория электрических цепей	7
2. Содержание учебной дисциплины ОП.01 Теория электрических цепей	10
3. Методические указания по выполнению и оформлению контрольной работы	16
4. Методические указания по выполнению контрольных заданий	18
5. Задания для выполнения контрольной работы	66
6. Экзаменационные вопросы по дисциплине ОП.01 Теория электрических цепей	73
Перечень рекомендуемых учебных изданий, Интернет-ресурсов, дополнительной литературы	76

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Дисциплина ОП.01 Теория электрических цепей является частью программы подготовки специалистов среднего звена в соответствии с ФГОС по специальности СПО 11.02.10 Радиосвязь, радиовещание и телевидение и входит в общепрофессиональный цикл.

ОП.01 Теория электрических цепей является базовой дисциплиной для получения студентами знаний по специальности. Данная дисциплина закладывает основы знаний и умений анализа и расчёта электротехнических и радиотехнических устройств и формирует соответствующие компетенции.

В результате освоения учебной дисциплины ОП.01 Теория электрических цепей обучающийся должен

**уметь:**

- рассчитывать электрические цепи постоянного и переменного тока;
- определять виды резонансов в электрических цепях.

В результате освоения учебной дисциплины «Теория электрических цепей» обучающийся должен

**знать:**

- физические процессы в электрических цепях постоянного и переменного тока;
- физические законы электромагнитной индукции;
- основные элементы электрических цепей постоянного и переменного тока, линейные и нелинейные электрические цепи и их основные элементы;
- основные законы и методы расчета электрических цепей;
- явление резонанса в электрических цепях.

Для лучшего усвоения учебного материала предусматривается выполнение одной домашней контрольной работы по значимым разделам курса. В учебно - методической карте указываются рекомендуемые к изучению страницы источников для организации самостоятельной работы. Список рекомендуемых источников приведен в конце методических указаний.

### **Перечень формируемых компетенций:**

#### **Общие компетенции (ОК):**

- ОК 1. Понимать сущность и социальную значимость своей будущей профессии, проявлять к ней устойчивый интерес.
- ОК 2. Организовывать собственную деятельность, выбирать типовые методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество.
- ОК 3. Принимать решения в стандартных и нестандартных ситуациях и нести за них ответственность.
- ОК 4. Осуществлять поиск и использование информации, необходимой для

эффективного выполнения профессиональных задач, профессионального и личностного развития.

- ОК 5. Использовать информационно-коммуникационные технологии в профессиональной деятельности.
- ОК 6. Работать в коллективе и команде, эффективно общаться с коллегами, руководством, потребителями.
- ОК 7. Брать на себя ответственность за работу членов команды (подчиненных), результат выполнения заданий.
- ОК 8. Самостоятельно определять задачи профессионального и личностного развития, заниматься самообразованием, осознанно планировать повышение квалификации.
- ОК 9. Ориентироваться в условиях частой смены технологий в профессиональной деятельности.

### **Профессиональные компетенции (ПК):**

- ПК 1.1. Выполнять монтаж и первичную инсталляцию оборудования систем радиосвязи и вещания.
- ПК 1.2. Выполнять монтаж и производить настройку сетей абонентского доступа на базе систем радиосвязи и вещания.

Приступая к изучению учебной дисциплины необходимо внимательно изучить список рекомендованных источников. Из списка рекомендованных источников следует опираться на источники, указанные как основные.

В процессе изучения дисциплины большая часть часов отводится на самостоятельную внеаудиторную работу, которая является основной частью усвоения дисциплины и выполняется в межсессионный период. Самостоятельная внеаудиторная работа включает изучение теоретического материала и ознакомление с решением типовых задач, выполнение одной домашней контрольной работы. Перед выполнением каждого задания контрольной работы необходимо внимательно изучить рекомендованный материал учебника и методического пособия, тщательно разобрать методические указания по его выполнению и примеры.

Работа должна быть оформлена аккуратно в отдельной ученической тетради в клетку с отчерченными полями, все страницы должны быть пронумерованы. Последовательность заполнения тетради: условие задачи №1 (полностью)- ее решение, условие задачи №2 (полностью)- ее решение и т.д. После решения последней задачи приводится список использованных источников, личная подпись и дата выполнения работы. Работа высылается на рецензирование в соответствии с учебным графиком. После получения зачетной работы студент должен внести исправления в соответствии с рецензией и показать их преподавателю во время экзаменационной сессии до экзамена. Если работа не зачтена, то в этой же тетради должны быть заново решены задачи, указанные преподавателем; затем тетрадь

высылается для повторного рецензирования.

При оценивании домашней контрольной работы студента учитывается следующее: качество выполнения практической части работы, качество оформления отчета по контрольной работе.

Работа оценивается следующим образом: «зачёт»- 80%-100% правильных ответов, «незачёт» - менее 80% правильных ответов. Стоимость каждого задания 1 балл. За правильное и логичное изложение ответа студент получает 1 балл. Если ответ правильный, но содержание и форма ответа имеют отдельные неточности, студент получает 0,5 балла. За неверный ответ или его отсутствие баллы не начисляются.

**Без представленной зачтенной контрольной работы студенты к сдаче экзамена не допускаются.**

## 1. Учебная карта дисциплины ОП.01 Теория электрических цепей

Наименование разделов и тем	Количество часов				Список источников	
	макс.	обзорные	лабор	самостоят. работа	№	Стр.
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Раздел 1. Основы электростатики и постоянный электрический ток</b>	<b>45</b>	<b>1,5</b>	<b>4</b>	<b>39,5</b>		
Тема 1.1. Основы электростатики	<b>9</b>			9	[1]д	3-14
Тема 1.2. Постоянный электрический ток	<b>12</b>	0,5	2	9,5	[3]	5-9
Тема 1.3. Цепи с резисторами при различных соединениях	<b>9</b>	0,5	2	6,5	[3] [5]	10-14 3-21
Тема 1.4. Методы расчёта электрических цепей. Законы Кирхгофа	<b>15</b>	0,5		14,5	[1]д	61-80, 87,88,94
<b>Раздел 2. Электромагнетизм и электромагнитная индукция</b>	<b>9</b>			<b>9</b>		
Тема 2.1 Магнитное поле тока	<b>3</b>			3	[1]д	118-131
Тема 2.2 Электромагнитная индукция	<b>6</b>			6	[1]д	131-143, 263
<b>Раздел 3. Цепи синусоидального тока</b>	<b>42</b>	<b>3,5</b>	<b>8</b>	<b>30,5</b>		
Тема 3.1. Основные сведения о переменном синусоидальном электрическом токе	<b>3</b>	0,5		2,5	[4] [1]д	5-52 151-157
Тема 3.2. Цепь	<b>6</b>	0,5		5,5	[1]	37-47

синусоидального тока с резистором, индуктивностью, ёмкостью					[3] [1]д	14-23 166-169
Тема 3.3. Цепь с резистором и индуктивностью	<b>6</b>	0,5	2	3,5	[3] [1]д	19-22 169-171
Тема 3.4. Цепь с резистором и ёмкостью	<b>6</b>	0,5	2	3,5	[3] [1]д	20-23 171-172
Тема 3.5. Последовательные цепи синусоидального тока	<b>9</b>	0,5	2	6,5	[1] [3]	37-48 24-31
Тема 3.6. Параллельные цепи синусоидального тока	<b>6</b>	0,5	2	3,5	[1] [3]	61-63 32-39
Тема 3.7 Применение символического метода для расчёта цепей синусоидального тока	<b>6</b>	0,5		5,5	[4] [4]д	11-21 17-19
<b>Раздел 4. Резонансные явления в электрических цепях. Электрические фильтры</b>	<b>25</b>	<b>1.5</b>		<b>23,5</b>		
Тема 4.1. Последовательный колебательный контур	<b>9</b>	0,5		8,5	[1] [3] [1]д	83-90 42-46 211-226
Тема 4.2. Параллельный колебательный контур	<b>9</b>	0,5		8,5	[3] [1]д	47-52 237-244
Тема 4.3. Связанные системы при различных видах связи	<b>4</b>	0,5		3,5	[1]д	263-291
Тема 4.4. Понятие об электрических фильтрах	<b>3</b>			3	[1]д	414
<b>Раздел 5. Цепи несинусоидального тока</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>9</b>		
Тема 5.1. Несинусоидальные токи и напряжения	<b>5</b>	0,5	2	2,5	[3] [1]д	53-59 292-297
Тема 5.2. Расчёт линейных цепей при негармонических воздействиях	<b>7</b>	0,5		6,5	[4]д	5-32
<b>Раздел 6. Переходные процессы в электрических</b>	<b>11</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>8,5</b>		

<b>цепях</b>						
Тема 6.1 Переходные процессы в цепях первого порядка	<b>11</b>	0,5	2	8,5	[1] [3] [1]д	114-138 60-64 344-364
<b>Всего по дисциплине</b>	<b>144</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>120</b>		

## **2. Содержание учебной дисциплины ОП.01 Теория электрических цепей**

### **Раздел 1. Основы электростатики и постоянный электрический ток**

#### **Тема 1.1. Основы электростатики**

**Введение.** Сущность, роль и место дисциплины в процессе подготовки к профессиональной деятельности.

Электрическое поле. Графическое изображение электрических полей. Напряжённость электрического поля. Потенциал. Напряжение. Электрическая ёмкость. Конденсаторы. Плоский конденсатор. Ёмкость плоского конденсатора (без вывода).

Последовательное, параллельное и смешанное соединение конденсаторов. Определение эквивалентной ёмкости, напряжения и зарядов на отдельных конденсаторах. Энергия электрического поля, её расчёт.

#### **Тема 1.2. Постоянный электрический ток**

Электрическая цепь и её элементы. Активный и пассивный двухполюсник. Электрический ток. Направление, величина и плотность тока. Электродвижущая сила (ЭДС). Электрическое сопротивление и проводимость. Закон Ома для участка цепи, для замкнутой цепи. Работа и мощность тока. Режимы работы источников: режим холостого хода, режим короткого замыкания, согласованный, номинальный режим работы.

**Лабораторная работа.** Исследование режимов работы электрической цепи

#### **Тема 1.3. Цепи с резисторами при различных соединениях**

Последовательное соединение резисторов. Эквивалентное сопротивление. Распределение напряжений на участках цепи. Параллельное соединение резисторов. Эквивалентное сопротивление. Распределение токов в ветвях. Первый закон Кирхгофа. Смешанное соединение резисторов. Распределение токов и напряжений. Баланс мощностей.

**Лабораторная работа.** Исследование электрической цепи со смешанным соединением резисторов

#### **Тема 1.4. Методы расчёта электрических цепей. Законы Кирхгофа**

Понятие о сложной электрической цепи. Второй закон Кирхгофа. Расчёт сложной цепи методами: уравнений Кирхгофа, контурных токов, наложения, узлового напряжения.

## **Раздел 2. Электромагнетизм и электромагнитная индукция**

### **Тема 2.1 Магнитное поле тока**

Графическое изображение магнитных полей. Магнитное поле прямолинейного проводника с током. Правило буравчика. Магнитное поле катушки с током. Правило правой руки (Ампера). Напряжённость магнитного поля. Магнитная проницаемость, магнитная индукция, магнитный поток, потокосцепление. Действие магнитного поля на проводник с током. Взаимодействие двух параллельных проводов с токами.

### **Тема 2.2 Электромагнитная индукция**

Явление электромагнитной индукции. Электродвижущая сила в прямолинейном проводнике при движении его в магнитном поле. Величина и направление ЭДС. Правило правой руки. ЭДС индукции, наведённая в контуре. Правило Ленца. ЭДС индукции в катушке. Явление самоиндукции. ЭДС самоиндукции, её величина и направление. Индуктивность. Энергия магнитного поля. Явление взаимной индукции. Трансформатор. Взаимная индуктивность двух катушек, коэффициент связи. Согласное и встречное включение двух катушек при их последовательном соединении.

## **Раздел 3. Цепи синусоидального тока**

### **Тема 3.1. Основные сведения о переменном синусоидальном электрическом токе**

Получение синусоидальной ЭДС. Графическое изображение синусоидальных величин: временные и векторные диаграммы. Уравнения, описывающие зависимость мгновенных значений ЭДС, напряжения или тока от времени. Характеристики синусоидальных величин: мгновенное, амплитудное, действующее и среднее значения, период, частота, угловая частота, фаза, начальная фаза. Сложение синусоидальных величин с одинаковыми частотами.

### **Тема 3.2. Цепь синусоидального тока с резистором, индуктивностью, ёмкостью**

Понятие об резистивном сопротивлении. Закон Ома для мгновенных, максимальных и действующих значений тока и напряжения. Временная и векторная диаграммы. Энергетический процесс. Мгновенная и средняя (резистивная) мощности. Цепь с индуктивным сопротивлением (идеальная катушка). Мгновенное значение тока, ЭДС самоиндукции и напряжения. Временная и векторная диаграммы. Закон Ома для действующих и амплитудных значений тока и напряжения. Индуктивное сопротивление, его зависимость от частоты. Энергетический процесс. Мгновенная, реактивная мощности. Изменение заряда на

обкладках конденсатора при синусоидальном напряжении (конденсатор без потерь). Мгновенное значение тока. Временная и векторная диаграммы. Закон Ома для действующих и амплитудных значений тока и напряжения. Ёмкостное сопротивление, его зависимость от частоты. Энергетический процесс. Мгновенная, реактивная мощности.

### **Тема 3.3. Цепь с резистором и индуктивностью**

Последовательное соединение резистивного и индуктивного сопротивлений (анализ реальной катушки). Временная и векторная диаграммы. Закон Ома для действующих и амплитудных значений. Полное сопротивление цепи. Угол сдвига фаз между напряжением и током. Энергетический процесс. Резистивная, реактивная и полная мощности. Амплитудно- частотные и фазо-частотные характеристики.

**Лабораторная работа.** Исследование электрической цепи переменного тока при последовательном соединении резистивного и индуктивного сопротивлений

### **Тема 3.4. Цепь с резистором и ёмкостью**

Последовательное соединение резистора и конденсатора (конденсатор с потерями). Временная и векторная диаграммы. Закон Ома для действующих и амплитудных значений. Полное сопротивление. Угол сдвига фаз между напряжением и током. Энергетический процесс. Резистивная, реактивная и полная мощности. Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики. Передаточные амплитудно- частотные и фазо-частотные характеристики.

**Лабораторная работа.** Исследование электрической цепи переменного тока при последовательном соединении резистивного и емкостного сопротивлений

### **Тема 3.5. Последовательные цепи синусоидального тока**

Последовательное соединение резистивного, индуктивного и ёмкостного сопротивлений. Второй закон Кирхгофа для мгновенных значений. Векторная диаграммы для различного характера цепи. Полное сопротивление. Закон Ома для действующих и амплитудных значений. Энергетический процесс. Резистивная, реактивная и полная мощности.

**Лабораторная работа.** Исследование электрической цепи синусоидального тока при последовательном соединении резистора, катушки индуктивности и конденсатора

### **Тема 3.6. Параллельные цепи синусоидального тока**

Параллельное соединение резистивно-индуктивного и резистивно - ёмкостного сопротивлений. Первый закон Кирхгофа для мгновенных значений. Векторные диаграммы для различного характера цепи. Разложение токов на активную и реактивную составляющие. Проводимости ветвей и полная

проводимость. Связь между действующими (и амплитудными) значениями тока и напряжения. Энергетический процесс.

**Лабораторная работа.** Исследование электрической цепи синусоидального тока при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора в неразветвлённой цепи синусоидального тока

### **Тема 3.7 Применение символического метода для расчёта цепей синусоидального тока**

Сущность символического метода. Три формы записи комплексного числа. Выражение тока, напряжения, сопротивления, проводимости, ЭДС электромагнитной индукции, мощности комплексными числами. Законы Ома и Кирхгофа в символическом виде. Расчёт цепей с последовательным, параллельным и смешанным соединениями сопротивлений.

## **Раздел 4. Резонансные явления в электрических цепях. Электрические фильтры**

### **Тема 4.1. Последовательный колебательный контур**

Понятие о колебательном контуре. Свободные колебания в идеальном контуре. Период, частота и длина волны свободных колебаний. Характеристическое сопротивление контура.

Свободные колебания в реальном контуре. Затухание колебаний. Добротность контура.

Вынужденные колебания. Полное сопротивление контура, его составляющие и зависимость их от частоты. Резонанс напряжений, условие его возникновения. Признаки резонанса. Резонансная частота. Векторная диаграмма. Коэффициент мощности. Коэффициент передачи по напряжению. Добротность. Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики. Расстройка. Полоса пропускания и избирательность. Практическое использование последовательных колебательных контуров.

### **Тема 4.2. Параллельный колебательный контур**

Параллельный контур. Токи в ветвях и в неразветвлённой части цепи.

Резонанс токов, условие его возникновения. Признаки резонанса. Резонансная частота. Векторная диаграмма. Полное эквивалентное сопротивление контура при резонансе и при расстройках, его активная и реактивная составляющие. Эквивалентная добротность параллельного контура с учётом влияния внутреннего сопротивления генератора. Полоса пропускания контура и её зависимость от внутреннего сопротивления генератора. Избирательность параллельного контура при различных внутренних сопротивлениях генератора. Контур второго вида. Автотрансформаторное (неполное) включение контура. Практическое использование параллельных контуров.

### **Тема 4.3. Связанные системы при различных видах связи**

Определение связанных контуров. Виды связи. Коэффициент связи при различных видах связи. Вносимое сопротивление. Схема замещения связанной системы эквивалентной одноконтурной цепью.

Условия резонанса для связанной цепи. Настройка связанных контуров. Виды резонансов в связанных системах. Критическая связь.

### **Тема 4.4. Понятие об электрических фильтрах**

Понятие о четырёхполюсниках. Коэффициент передачи по напряжению. Определение, классификация, полоса пропускания и задерживания электрических фильтров. Частотные характеристики, рабочее затухание, входное сопротивление фильтров. Применение фильтров в технике связи.

## **Раздел 5. Цепи несинусоидального тока**

### **Тема 5.1. Несинусоидальные токи и напряжения**

Понятие о несинусоидальных (негармонических) токах и напряжениях. Возникновение несинусоидальных токов. Понятие о нелинейных элементах. Сложение синусоид, имеющих разные частоты. Выражение сложной периодической кривой с помощью тригонометрического ряда (ряда Фурье). Постоянная составляющая, основная и высшие гармоники. Симметричные и несимметричные кривые. Разложение периодических кривых на гармоники. Понятие о спектрах.

Влияние активного сопротивления, индуктивности и ёмкости на форму кривой тока при несинусоидальном напряжении.

Самостоятельная работа. Негармонические токи и напряжения. Влияние активного сопротивления, индуктивности и ёмкости на форму кривой тока при несинусоидальном напряжении

Резонанс отдельных гармонических составляющих. Использование несинусоидальных токов в технике связи. Понятие о фильтрации.

### **Тема 5.2. Расчёт линейных цепей при негармонических воздействиях**

Действующие значения несинусоидального тока и напряжения. Мощность несинусоидального тока. Коэффициенты, характеризующие степень несинусоидальности периодических кривых (коэффициент искажений, коэффициент амплитуды). Расчёт цепей при негармонических воздействиях.

**Лабораторная работа.** Получение периодических сигналов негармонической формы

## **Раздел 6. Переходные процессы в электрических цепях**

### **Тема 6.1. Переходные процессы в цепях первого порядка**

Причины возникновения переходных процессов. Законы коммутации. Включение цепи RL на постоянное напряжение. Короткое замыкание в цепи RL. Законы изменения тока и напряжения. Постоянная времени. Длительность процесса. Энергетический процесс.

Заряд и разряд конденсатора через активное сопротивление. Законы изменения тока и напряжения. Постоянная времени. Энергетический процесс.

**Лабораторная работа.** Исследование переходных процессов в цепи с резистором и конденсатором

### 3. Методические указания по выполнению и оформлению контрольной работы

1. Вариант контрольной работы выбирается согласно указаниям отделения заочного обучения на текущий учебный год в соответствии с индивидуальным шрифтом студента.

2. При подготовке к выполнению задания рекомендуется изучить теорию соответствующего раздела дисциплины по учебнику, конспекту, ознакомиться с методическими указаниями по выполнению контрольной работы по дисциплине «Теория электрических цепей».

3. Контрольная работа выполняется в тетради в клетку. Записи выполняются через клетку грамотно, разборчиво, аккуратно.

При выполнении работы необходимо правильно оформить контрольную работу в соответствии с требованиями стандарта организации (Стандарт организации СТО 1.01 – 2015):

- записать полное условие задачи. В графу "Дано" - данные для расчета следует записывать в основных физических единицах системы СИ, искомые величины записываются в графу "Найти";

- схемы и графики должны быть изображены карандашом, нумерация рисунков в контрольной работе сквозная;

- необходимо записывать пояснения к каждому действию при решении всех задач;

- при выполнении расчетов следует записать формулу в буквенном выражении, подставить в нее числовые значения в основных физических единицах системы СИ, не указывая единиц измерения каждой величины, записать ответ и указать размерность величины;

- вычисления следует производить с точностью до трех значащих цифр;

- окончательные расчеты необходимо записать в графу "Ответ";

- на графиках на каждой из осей должна быть нанесена равномерная шкала в выбранных единицах измерения. Векторные диаграммы тоже необходимо строить в масштабе, масштаб указывается следующим образом:

а) для напряжения:  $M_U = \dots \frac{B}{см}$ ;

б) для тока:  $M_I = \dots \frac{A}{см}$ ;

- по возникшим, в процессе выполнения работы, вопросам можно решить проконсультироваться устно или письменно с преподавателем, чтобы не отставать от учебного графика;

- в конце работы следует привести список использованных источников, которые использовались для выполнения работы, указать дату выполнения работы, указать Вашу подпись;

- Зачтенная работа сохраняется студентом до экзамена и предъявляется на экзамене со всеми необходимыми исправлениями и дополнениями согласно рецензии преподавателя.

При оценивании домашней контрольной работы студента учитывается следующее: качество выполнения практической части работы, качество оформления отчета по контрольной работе.

Работа оценивается следующим образом: «зачёт»- 80%-100% правильных ответов, «незачёт» - менее 80% правильных ответов. Стоимость каждого задания 1 балл. За правильное и логичное изложение ответа студент получает 1 балл. Если ответ правильный, но содержание и форма ответа имеют отдельные неточности, студент получает 0,5 балла. За неверный ответ или его отсутствие баллы не начисляются.

**К экзамену студент допускается при наличии зачтенной контрольной работы и зачтенных лабораторных работ.**

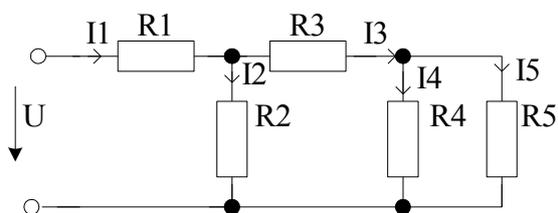
## 4. Методические указания по выполнению контрольных заданий

### Задача 1

Электрической цепью называется совокупность устройств, предназначенных для получения (источник), передачи (провода) и преобразования электрической энергии (потребитель). Если внешняя электрическая цепь состоит только из резисторов, то ее называют резистивной ( $R$  – цепь). Резистивные элементы могут соединяться друг с другом различными способами. Существует четыре основных вида соединений: последовательное, параллельное, звезда и многоугольник.

#### Пример расчета простой электрической цепи

Рассмотрим расчет цепи при заданном напряжении на входе электрической цепи.



Исходные данные:

$$R_1 = 4 \text{ Ом}, R_2 = 18 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 3 \text{ Ом}, R_4 = 15 \text{ Ом}$$

$$R_5 = 10 \text{ Ом}$$

$$U = 30 \text{ В}$$

Рисунок 1 – Схема со смешанным соединением резисторов

1 Указываем направление токов во всех ветвях от «+» источника. Через источник и  $R_1$  протекает  $I_1$ . В узле «а»  $I_1$  делится на  $I_2$  и  $I_3$ ;  $I_3$  в узле «в» делится на  $I_4$  и  $I_5$ .

$R_{ВХ}$  определим методом упрощения схемы. Расчет  $R_{ВХ}$  выполняется с конца схемы.

$$R_{4-5} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5}$$

Схема после упрощения примет вид:

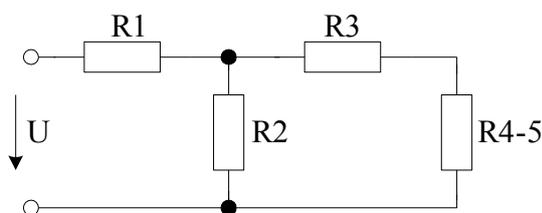


Рисунок 2 – Эквивалентная схема

$$R_{4-5} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{15 \cdot 10}{15 + 10} = 6 \text{ Ом}$$

Так как резистор R4-5 получился из параллельного соединения R4 и R5, то для него справедливы соотношения:

$$U_{4-5} = U_4 = U_5$$

(это одно и то же напряжение).

$$I_{4-5} = I_4 + I_5$$

После упрощения в схеме устранились узлы «в» и «г», следовательно, резистор R3 соединен последовательно с резистором R4-5.

$$R_{3-5} = R_3 + R_{4-5} = 3 + 6 = 9 \text{ Ом}$$

Схема после упрощения примет вид:

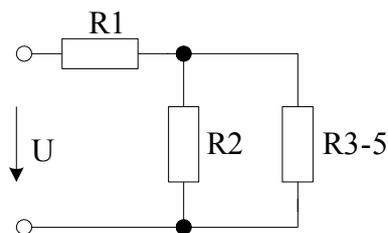


Рисунок 3 – Эквивалентная схема

Так как резистор R3-5 получен из последовательного соединения R3 и R4-5, то для него справедливы соотношения:

$$U_{3-5} = U_3 + U_{4-5}$$

$$I_{3-5} = I_3 = I_{4-5}$$

(это один и тот же ток).

Резисторы R2 и R3-5 включены к одним и тем же узлам, следовательно соединены параллельно.

$$R_{2-5} = \frac{R_2 \cdot R_{3-5}}{R_2 + R_{3-5}} = \frac{18 \cdot 9}{18 + 9} = 6 \text{ Ом}$$

Схема после упрощения примет вид:

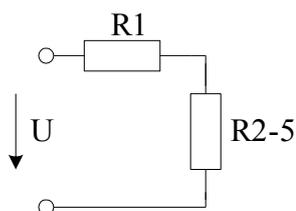


Рисунок 4 – Эквивалентная схема

Для резистора R2-5 справедливы соотношения:

$$U_{2-5} = U_2 = U_{3-5}$$

$$I_{2-5} = I_2 + I_{3-5}$$

В схеме устранились узлы «а» и «б», следовательно резисторы R1 и R2-5 соединены последовательно:

$$R_{BX} = R_1 + R_{2-5}$$

После упрощения схема примет вид:

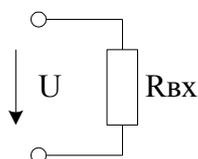


Рисунок 5 – Эквивалентная схема

Для  $R_{BX}$  справедливы соотношения:

$$I_1 = I_{2-5}$$

$$U = U_1 + U_{2-5}$$

1 Определяем все токи и напряжения. Так как задано напряжение на входе цепи, то расчет начинаем с последней схемы замещения. Для определения  $I_1$  воспользуемся законом Ома для внешнего участка цепи:

$$I_1 = \frac{U}{R_{BX}} = \frac{30}{10} = 3A$$

$I_1$  протекает по R1 и через источник (R1 и источник образуют одну ветвь). Напряжение на резисторе R1 определим по закону Ома для участка с R1.

$$U_1 = I_1 \cdot R_1 = 3 \cdot 4 = 12B$$

Затем переходим к предпоследней схеме замещения. Так как  $I_1=I_{2-5}$ , то можно определить  $U_{2-5}$ , применив закон Ома к резистору  $R_{2-5}$ .

$$U_{2-5} = I_{2-5} \cdot R_{2-5} = 3 \cdot 6 = 18B$$

Переходим к схеме и, используя  $U_{2-5} = U_2 = U_{3-5}$ , определяем по закону Ома  $I_2$  и  $I_{3-5}$ .

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{18}{18} = 1A$$

$$I_{3-5} = \frac{U_{3-5}}{R_{3-5}} = \frac{18}{9} = 2A$$

Переходим к схеме (рисунок 14) и, используя  $I_{3-5}=I_3=I_{4-5}$ , по закону Ома для этих участков определяем  $U_3$  и  $U_{4-5}$ .

$$U_3 = I_3 \cdot R_3 = 2 \cdot 3 = 6B$$

$$U_{4-5} = I_{4-5} \cdot R_{4-5} = 2 \cdot 6 = 12B$$

Переходим к исследуемой схеме и, используя  $U_{4-5} = U_4 = U_5$ , определяем  $I_4$  и  $I_5$  по закону Ома для этих участков.

$$I_4 = \frac{U_4}{R_4} = \frac{12}{15} = 0,8A$$

$$I_5 = \frac{U_5}{R_5} = \frac{12}{10} = 1,2A$$

В схеме рассчитаны все токи и напряжения.

2 Для проверки правильности расчета составим баланс мощностей. Мощность источника определим по формуле:

$$P_0 = U \cdot I_1$$

Так как источник задан напряжением. При  $R_i=0$  потери мощности внутри источника отсутствуют, т.е.  $P_i=0$ .

$$P_0 = 30 \cdot 3 = 90Bm$$

Мощность, потребляемую внешней цепью, определяем по формуле:

$$\sum P = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5$$

$$\sum P = 3^2 \cdot 4 + 1^2 \cdot 18 + 2^2 \cdot 3 + 0,8^2 \cdot 15 + 1,2^2 \cdot 10 = 90Bm$$

Так как  $P_0 = \sum P$ , то схема рассчитана, верно.

## Методические указания к решению задачи 2

**Сложной** называется разветвленная электрическая цепь, содержащая два и более источника.

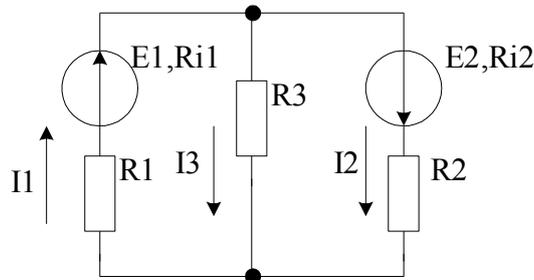


Рисунок 6 – Схема сложной электрической цепи

Электрическая цепь (рисунок 1) содержит: 2 узла, 3 ветви, 2 внутренних контура.

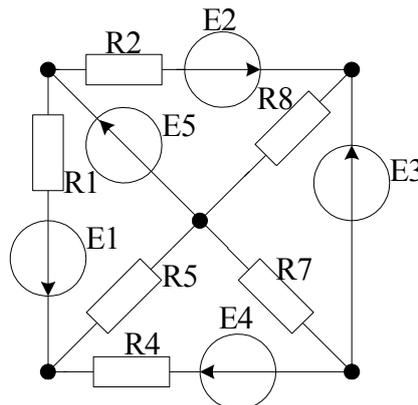


Рисунок 7 - Схема сложной электрической цепи

Электрическая цепь (рисунок 2) содержит: 5 узловых точек, 8 ветвей, 4 внутренних контура.

При расчете сложных цепей определяются токи в ветвях. Количество токов в электрической цепи определяется числом ветвей. В схеме 1 следует рассчитать токи в ветвях:  $I_1$ ;  $I_2$ ;  $I_3$ , в схеме 2 -  $I_1$ ,  $I_2$ , ...  $I_8$ .

Методы расчета сложных цепей:

- метод уравнений Кирхгофа;
- метод наложения;
- метод контурных токов.

## Второй закон Кирхгофа

В замкнутом контуре сложной электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС источников равна алгебраической сумме произведений токов на сопротивления тех участков по которым этот ток протекает.

В общем виде:

$$\sum E = \sum I \cdot (R + R_i)$$

При составлении уравнений для замкнутого контура необходимо учитывать «правила знаков»:

- если направление ЭДС источника совпадает с направлением обхода контура (НОК), то перед ней записывается знак «плюс», если направление ЭДС источника не совпадает с НОК – знак «минус»;

- если направление тока в ветви совпадает с НОК, то перед произведением тока на сопротивление участка цепи (падением напряжения участка цепи) становится знак «плюс», если направление тока в ветви не совпадает с НОК – знак «минус».

Например, для замкнутого контура, принадлежащего сложной цепи (рисунок 8) уравнение по II закону Кирхгофа имеет вид:

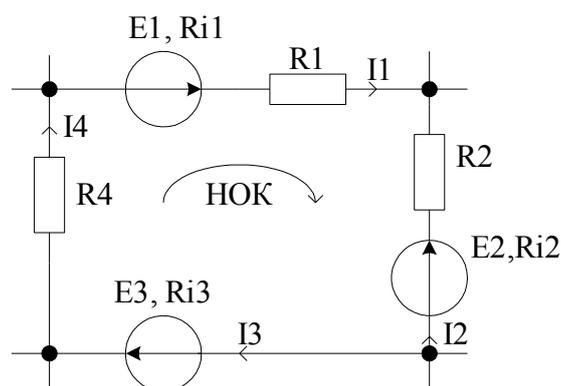


Рисунок 8 – Схема сложной электрической цепи

$$E_1 - E_2 + E_3 = I_1 \cdot (R_1 + R_{i1}) - I_2 \cdot (R_2 + R_{i2}) + I_3 \cdot R_{i3} + I_4 \cdot R_4$$

Перед  $E_1$  и  $E_3$  – ставится знак «плюс», т.к. их направления совпадают с НОК (по часовой стрелке); перед  $E_2$  – знак «минус» она направлена против НОК.

Напряжения на участках  $(R_1 + R_{i1})$ ;  $R_{i3}$ ;  $R_4$  записываются со знаком «плюс», т.к. направление токов  $I_1$ ;  $I_3$ ;  $I_4$  совпадают с НОК, перед напряжением на участке  $(R_2 + R_{i2})$  – знак «минус», т.к. направления  $I_2$  не совпадают с НОК.

## Методика составления уравнений по законам Кирхгофа

1 Определить в схеме количество ветвей ( $m$ ). В каждой ветви произвольно расставить направление тока в ветвях. Количество уравнений определяется числом неизвестных токов.

2 Определить количество узлов. Для  $(n - 1)$  узла составить уравнения по I закону Кирхгофа.

3 Недостающее уравнения ( $m - (n - 1)$ ) составить по второму закону Кирхгофа для внутренних контуров, указав в них направления обхода контура.

4 Подставить числовые значения и решить получившуюся систему уравнений.

Если в результате расчета ток получился положительным, то действительное направление тока совпадает с предполагаемым, если отрицательным, то противоположно.

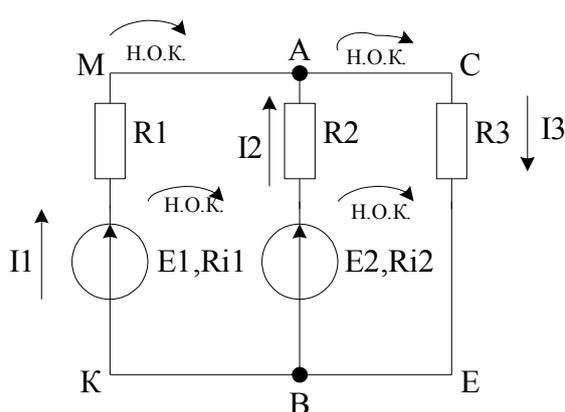
5 Проверка решения баланс мощностей:

$$\sum P_o = \sum P,$$

где  $\sum P_o$  - алгебраическая сумма мощностей источников, в которой мощность источника берется со знаком плюс, если действительное направление тока в ветви совпадает с направлением действия ЭДС и со знаком минус, если действительное направление тока противоположно действию ЭДС.

$\sum P$  - сумма мощностей, рассеиваемых в резистивных сопротивлениях цепи.

### Пример расчёта сложной цепи методом уравнений Кирхгофа



Исходные данные:

$$R_1 = 18 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 27 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 60 \text{ Ом}$$

$$E_1 = 120 \text{ В}, R_{i1} = 2 \text{ Ом}$$

$$E_2 = 45 \text{ В}, R_{i2} = 3 \text{ Ом}$$

Рисунок 9 – Схема сложной цепи

Для расчёта токов в ветвях сложной цепи (рисунок 9):

1 Определяем количество ветвей  $m = 3$ , узлов  $n = 2$ , внутренних контуров  $k = 2$ .

2 Расставляем произвольно направления токов в ветвях (выбранные направления указаны на рисунке 4).

3 Составляем столько уравнений, сколько неизвестных токов. В данной схеме нужно составить 3 уравнения (т.к. неизвестных 3 тока): из них по I закону Кирхгофа (n – 1) уравнение. Поскольку схема содержит две узловые точки: А и В, составляем одно уравнение по I закону Кирхгофа:

$$I_1 + I_2 = I_3 \text{ (для узла А)}$$

4 Недостающие 2 уравнения: (m – (n – 1)) = 3 – (2 - 1) = 2 составляем по II закону Кирхгофа для внутренних контуров, указав в них кривой стрелкой направление обхода контура. При составлении уравнений в левой части перед E ставим знак «+», если её направление совпадают с НОК; и знак « - », если противоположно НОК В правой части уравнения перед произведением тока на сопротивление участка цепи ставим знак «+», если выбранное направление тока совпадает с НОК и « - », если не совпадает.

5 При обходе контура МАВК по часовой стрелке перед E1,  $I_1 \cdot (R_1 + R_{i1})$  поставим знаки «+» (направления совпадают), а перед E2,  $I_2 \cdot (R_2 + R_{i2})$  - знаки

6 « - » (направления не совпадают).

7 При обходе контура АСЕВ по часовой стрелке перед E2,  $I_2 \cdot (R_2 + R_{i2})$ ;  $I_3 \cdot R_3$  поставим знаки «+» (направления совпадают).

8 Получаем уравнения вида:

$$E_1 - E_2 = I_1 \cdot (R_1 + R_{i1}) - I_2 \cdot (R_2 + R_{i2}) \text{ (для контура МАВК)}$$

$$E_2 = I_2 \cdot (R_2 + R_{i2}) + I_3 \cdot R_3 \text{ (для контура АСЕВ)}$$

9 Полученная система уравнений по законам Кирхгофа имеет вид:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ E_1 - E_2 = I_1 \cdot (R_1 + R_{i1}) - I_2 \cdot (R_2 + R_{i2}) \\ E_2 = I_2 \cdot (R_2 + R_{i2}) + I_3 \cdot R_3 \end{cases}$$

10 Подставляем исходные данные и решаем систему одним из математических способов – алгебраического сложения.

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ 120 - 45 = I_1 \cdot (18 + 2) - I_2 \cdot (27 + 3) \\ 45 = I_2 \cdot (27 + 3) + I_3 \cdot 60 \end{cases}$$

Приводим уравнение к виду:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ 75 = 20 \cdot I_1 - 30 \cdot I_2 \\ 45 = 30 \cdot I_2 + 60 \cdot I_3 \end{cases}$$

Избавимся от одного из неизвестных, для этого в уравнении 3 заменим  $I_3$  на  $(I_1 + I_2)$ .

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ 75 = 20 \cdot I_1 - 30 \cdot I_2 \\ 45 = 30 \cdot I_2 + 60 \cdot (I_1 + I_2) \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ 75 = 20 \cdot I_1 - 30 \cdot I_2 \quad | \cdot 3 \\ 45 = 60 \cdot I_1 + 90 \cdot I_2 \end{cases}$$

Выполняем алгебраическое сложение второго и третьего уравнения. Предварительно уравниваем коэффициенты перед  $I_2$ .

$$\begin{array}{r} 225 = 60 \cdot I_1 - 90 \cdot I_2 \\ + \\ 45 = 60 \cdot I_1 + 90 \cdot I_2 \\ \hline 270 = 120 \cdot I_1 \end{array}$$

Находим  $I_1$ :

$$I_1 = \frac{270}{120} = 2,25 \text{ A}$$

Определяем ток  $I_2$ , выразив его из уравнения два:

$$I_2 = \frac{60 \cdot I_1 - 225}{90} = \frac{60 \cdot 2,25 - 225}{90} = -1 \text{ A}$$

Определяем ток  $I_3$  из уравнения, составленного по I закону Кирхгофа:

$$I_3 = I_1 + I_2 = 2,25 + (-1) = 1,25 \text{ A}$$

Токи  $I_1$  и  $I_3$  в расчётах получились со знаками «+», что означает, что их действительные направления совпадают с выбранными. Ток  $I_2$  имеет знак «-», поэтому его действительное направление противоположно выбранному.

Расставляем в схеме (рисунок 5) действительные направления токов в ветвях.

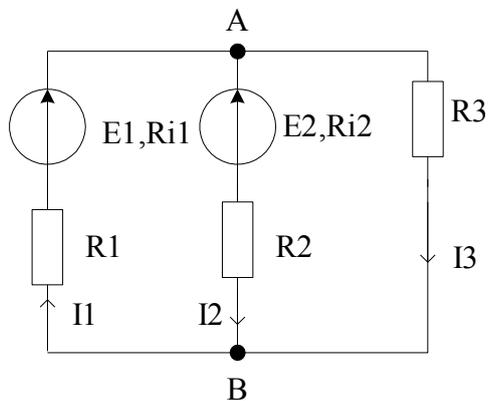


Рисунок 10 – Схема сложной электрической цепи

11 Определяем режимы работы источников и составляем баланс мощностей.

12 Источник  $E_1$  работает в режиме генератора, т.к. направление действительного тока  $I_1$  совпадает с направлением  $E_1$ , поэтому при составлении баланса мощностей  $P_{o1} = E_1 \cdot I_1 > 0$ . Источник  $E_2$  – в режиме потребителя т.к. направление действительного тока  $I_2$  противоположно действию  $E_2$ , поэтому  $P_{o2} = E_2 \cdot I_2 < 0$ .

13 С учетом этого составляем баланс мощностей:

$$E_1 \cdot I_1 - E_2 \cdot I_2 = I_1^2 \cdot (R_1 + R_{i1}) + I_2^2 \cdot (R_2 + R_{i2}) + I_3^2 \cdot R_3$$

Подставляем полученные токи и ЭДС источников:

$$120 \cdot 2,25 - 45 \cdot 1 = 2,25^2 \cdot (18 + 2) + 1 \cdot (27 + 3) + 1,25^2 \cdot 60$$

$$270 - 45 = 101,25 + 30 + 93,75$$

$$225 \text{ Вт} = 225 \text{ Вт}$$

Так как алгебраическая сумма мощностей источников равна сумме мощностей потребителей, расчёт выполнен верно.

## Метод контурных токов

Данный метод дает возможность определить токи в ветвях с помощью стольких уравнений, сколько внутренних контуров имеет электрическая цепь.

Уравнения для контуров составляются по II закону Кирхгофа, необходимость в составлении уравнений по I закону Кирхгофа отпадает.

Назовем токи, протекающие по контуру – контурными токами. Их обозначают буквенными индексами. Например, в схеме изображенной на рисунке 7 можно считать, что по всем элементам контура МАВК протекает один и тот же контурный ток  $I_A$ , по всем элементам контура АСЕВ протекает внутренний ток  $I_B$ . Данная цепь содержит два внутренних контура, поэтому для определения действительных токов в ветвях необходимо составить два уравнения по II закону Кирхгофа.

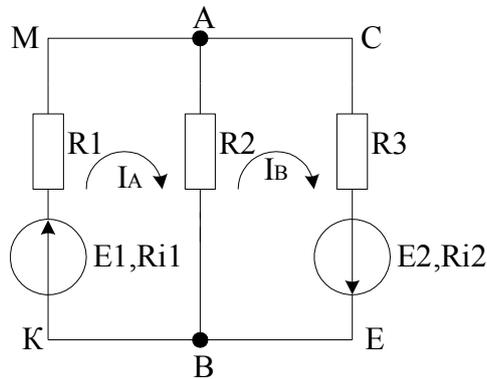


Рисунок 11 – Схема сложной электрической цепи

### Порядок расчёта сложной цепи методом контурных токов

1 Во внутренних контурах кривой стрелкой произвольно указать направления контурных токов и обозначить их. На схеме (рисунок 7) показаны контурные токи  $I_A$  и  $I_B$ .

2 Составить уравнения для каждого внутреннего контура по II закону Кирхгофа. Обход контура совместить с направлением контурного тока.

При составлении уравнений необходимо учитывать падение напряжения от тока соседнего контура, если он протекает по резистору, входящему в выбранный контур.

Это напряжение берется со знаком «плюс», если направления контурных токов на резисторе совпадают и со знаком «минус» если не совпадают. Для контура МАВК уравнение имеет вид:

$$E_1 = I_A \cdot (R_1 + R_{i1} + R_3) - I_B \cdot R_3$$

На участке с  $R_3$  в контуре МАВК протекают два контурных тока. В уравнении учитываем напряжения от  $I_A$  и  $I_B$ . Направления токов противоположны, поэтому напряжение от тока  $I_B$  берем со знаком «минус».

Для контура, АСЕВ уравнение имеет вид:

$$E_2 = I_B \cdot (R_2 + R_{i2} + R_3) - I_A \cdot R_3$$

На участке с  $R_3$  в контуре АСЕВ протекают два контурных тока. Учитываем напряжение от тока,  $I_B$  и  $I_A$ . Направление их противоположны, поэтому напряжение от тока  $I_A$  берем со знаком «минус».

3 Подставить числовые значения и решить систему уравнений, относительно  $I_A$  и  $I_B$ .

4 Действительные токи в ветвях сложной цепи определяют, как алгебраическую сумму контурных токов:

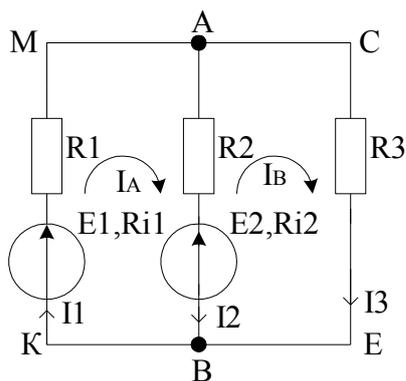
- если по ветви протекает один контурный ток ( $I_K$ ), то действительный ток ветви равен контурному току и направлен в ту же сторону, если  $I_K > 0$  и противоположно, если  $I_K < 0$ .

- если по ветви протекает несколько контурных токов, то действительный ток равен их алгебраической сумме и направлен в сторону большего тока.

5 Проверка решения баланс мощностей.

### Примеры расчёта сложной цепи методом контурных токов

Определим значения и направления токов в ветвях для схемы, изображенной на рисунке 12.



Исходные данные:

$$R_1 = 18 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 27 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 60 \text{ Ом}$$

$$R_{i1} = 2 \text{ Ом}, E_1 = 120 \text{ В}$$

$$R_{i2} = 3 \text{ Ом}, E_2 = 45 \text{ В}$$

Рисунок 12 – Схема электрической цепи

1 Данная цепь имеет два внутренних контура: в контуре МАКВ протекает контурный ток  $I_A$ , в контуре АСЕВ контурный ток  $I_B$ . Выбираем направление контурных токов по часовой стрелке.

2 Составляем уравнения для каждого внутреннего контура по II закону Кирхгофа. Направление обхода контура совмещаем с направлением контурного тока.

Для контура МАВК получим уравнение вида:

$$E_1 - E_2 = I_A \cdot (R_1 + R_{i1} + R_2 + R_{i2}) - I_B \cdot (R_{i2} + R_2)$$

На участке цепи с  $R_{i2}$  и  $R_2$  протекает два контурных тока. Учитываем напряжение от  $I_A$  и  $I_B$ . Направления токов противоположны, поэтому напряжение от тока  $I_B$  берется со знаком «минус».

Для контура АСЕВ получим уравнение вида:

$$E_2 = I_B \cdot (R_2 + R_{i2} + R_3) - I_A \cdot (R_{i2} + R_2)$$

Так как во второй ветви протекает два контурных тока, то учитывают напряжение от тока  $I_A$  и  $I_B$ . Направления их противоположны, поэтому напряжение от тока  $I_B$  берем со знаком «минус».

3 Подставим исходные данные, получаем систему уравнений вида:

$$\begin{cases} 120 - 45 = I_A \cdot (2 + 18 + 3 + 27) - I_B \cdot (3 + 27) \\ 45 = I_B \cdot (3 + 27 + 60) - I_A \cdot (3 + 27) \end{cases} \quad \text{или}$$
$$\begin{cases} 75 = I_A \cdot 50 - I_B \cdot 30 \\ 45 = -I_A \cdot 30 + I_B \cdot 90 \end{cases}$$

Решаем систему из двух уравнений. Для этого уравнений первой строки умножаем почленно на три и выполним алгебраическое сложение уравнений:

$$\begin{array}{r} 225 = I_A \cdot 150 - I_B \cdot 90 \\ + \\ 45 = -I_A \cdot 30 + I_B \cdot 90 \\ \hline 270 = I_A \cdot 120 \end{array}$$

Отсюда  $I_A = 2,25$  А.

Подставив значения  $I_A$  в уравнении первой строки, определим ток  $I_B$ .

$$\begin{aligned} 75 &= 50 \cdot 2,25 - I_B \cdot 30 \\ 30 \cdot I_B &= 50 \cdot 2,25 - 75 = 37,5 \\ I_B &= \frac{37,5}{30} = 1,25 \text{ А} \end{aligned}$$

4 Определяем величину и направление действительных токов:

- в первой ветви протекает контурный ток  $I_A$ , поэтому действительный ток  $I_1$  равен контурному току  $I_A$  и направлен в ту же сторону ( $I_A > 0$ ).

$$I_1 = I_A = 2,25 \text{ А}$$

- во второй ветви протекает два контурных тока  $I_A = 2,25$  А и  $I_B = 1,25$  А в противоположных направлениях. Действительный ток ветви  $I_2$  равен разности контурных токов и направлен в сторону  $I_A$ .

$$I_2 = I_A - I_B = 2,25 - 1,25 = 1 \text{ А}$$

- в третьей ветви протекает контурный ток  $I_B$ , поэтому действительный ток  $I_3$  равен контурному току  $I_B$  и направлен в ту же сторону ( $I_B > 0$ ).

$$I_3 = I_B = 1,25A$$

На исходной схеме (рисунок 10) показываем направление действительных токов в ветвях.

Полученные токи:  $I_1 = 2,25A$ ,  $I_2 = 1A$ ,  $I_3 = 1,25A$  совпадают с ответами при расчете сложной цепи методом уравнений Кирхгофа (рисунок 9).

### Метод наложения

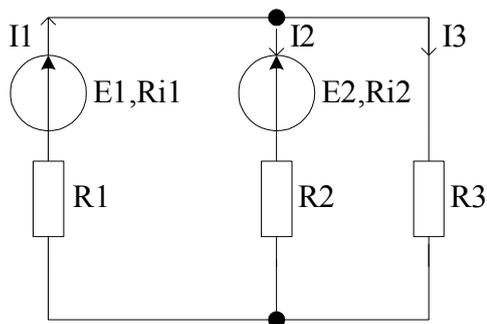
Метод наложения заключается в том, что действительные токи в ветвях сложной цепи определяют как алгебраическую сумму токов от каждого источника.

#### Порядок расчёта сложной цепи методом наложения

- 1 Электрическую цепь разбивают на ряд цепей по числу источников.
- 2 В каждой цепи оставляют один источник, остальные заменяют на внутреннее сопротивление. Цепи рассчитывают, определяют частичные токи от каждого источника. Их обозначают:  $I'_1, I'_2, I'_3$  от источника  $E_1$ ;  $I''_1, I''_2, I''_3$  от источника  $E_2$ .
- 3 Действительные токи определяем как алгебраическую сумму частичных токов.

#### Пример расчета сложной цепи методом наложения

Схема изображенная на рисунке 10 содержит два источника ЭДС. Для определения токов в ветвях её следует разбить на две частичные схемы и рассчитать их.



Исходные данные:

$$R_1 = 4 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 3 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 12 \text{ Ом}$$

$$E_1 = 72 \text{ В}, R_{i1} = 2 \text{ Ом}$$

$$E_2 = 24 \text{ В}, R_{i2} = 1 \text{ Ом}$$

Рисунок 13 – Схема сложной электрической цепи

- 1) В цепи оставляем источник  $E_1$ , источник  $E_2$  заменяем на внутреннее сопротивление  $R_{i2}$ .

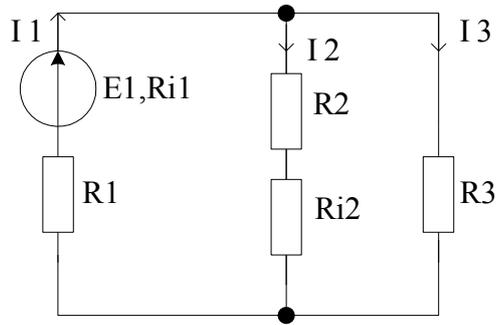


Рисунок 14 – Схема с источником  $E_1$

$$R'_{ex} = R_1 + \frac{(R_2 + R_{i2}) \cdot R_3}{R_2 + R_{i2} + R_3} = 4 + \frac{(3+1) \cdot 12}{3+1+12} = 4 + 3 = 7 \text{ Ом}$$

Определяем ток до разветвления:

$$I'_1 = \frac{E_1}{R'_{ex} + R_{i1}} = \frac{72}{7+2} = 8 \text{ А}$$

Определим токи в параллельных ветвях:

$$I'_2 = \frac{I'_1 \cdot R_3}{R_2 + R_{i2} + R_3} = \frac{8 \cdot 12}{3+1+12} = \frac{96}{16} = 6 \text{ А}$$

$$I'_3 = \frac{I'_1 \cdot (R_2 + R_{i2})}{R_2 + R_{i2} + R_3} = \frac{8 \cdot 4}{3+1+12} = \frac{32}{16} = 2 \text{ А}$$

2) В цепи оставляем источник  $E_2$ , источник  $E_1$  заменяем на внутреннее сопротивление  $R_{i1}$ .

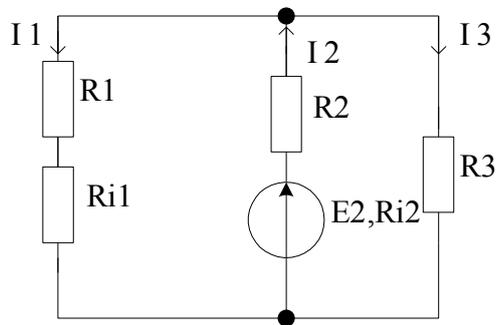


Рисунок 15 – Схема с источником  $E_2$

$$R''_{ex} = R_2 + \frac{(R_1 + R_{i1}) \cdot R_3}{R_1 + R_{i1} + R_3} = 3 + \frac{(5+1) \cdot 12}{5+1+12} = 3 + 4 = 7 \text{ Ом}$$

Ток до разветвления  $I''_2$  определяем:

$$I''_2 = \frac{E_2}{R''_{\text{вх}} + R_{i2}} = \frac{24}{7 + 1} = 3A$$

Токи в параллельных ветвях:

$$I''_1 = \frac{I'_1 \cdot R_3}{R_1 + R_{i1} + R_3} = \frac{3 \cdot 12}{5 + 1 + 12} = \frac{36}{18} = 2A$$

$$I''_3 = \frac{I''_2 \cdot (R_1 + R_{i1})}{R_1 + R_{i1} + R_3} = \frac{3 \cdot (5 + 1)}{5 + 1 + 12} = \frac{18}{18} = 1A$$

3) Определяем действительные токи в ветвях, как алгебраическую сумму частичных токов:

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = 8 - 2 = 6A$$

$$I_2 = I'_2 - I''_2 = 6 - 3 = 3A$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = 2 + 1 = 3A$$

Если частичные токи ветвей имеют одинаковое направление, то действительный ток равен сумме частичных токов и направлен в ту же сторону. Если частичные токи ветвей имеют противоположное направление, то действительный ток ветви равен разности частичных токов и направлен в сторону большего тока. Направление укажем в исходной схеме (рисунок 10).

4) Составим баланс мощностей, источник  $E_1$  работает в режиме генератора, источник  $E_2$  – в режиме потребителя:

$$E_1 \cdot I_1 - E_2 \cdot I_2 = I_1^2 \cdot (R_1 + R_{i1}) + I_2^2 \cdot (R_2 + R_{i2}) + I_3^2 \cdot R_3$$

$$72 \cdot 6 - 24 \cdot 3 = 6^2 \cdot (4 + 2) + 3^2 \cdot (3 + 1) + 3^2 \cdot 12$$

$$432 - 72 = 216 + 36 + 108$$

$$360Vm = 360Vm$$

## Методические указания к решению задачи 3

### Переменный синусоидальный ток и его характеристики

Электрический ток, изменяющийся с течением времени по величине или направлению, называется переменным.

Рассмотрим примеры переменных токов.

На временной диаграмме, представленной на рисунке 1, ток меняется только по направлению.

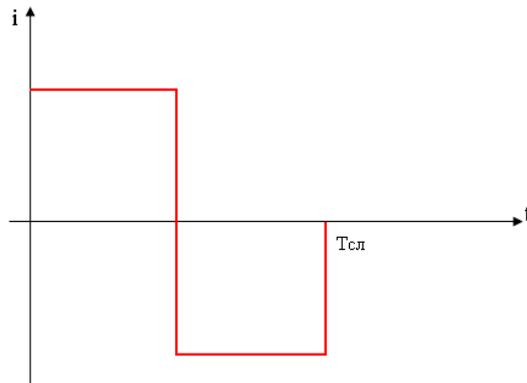


Рисунок 16 – Временная диаграмма. Прямоугольный двухсторонний сигнал

На временной диаграмме, представленной на рисунке 2, ток меняется только по величине.

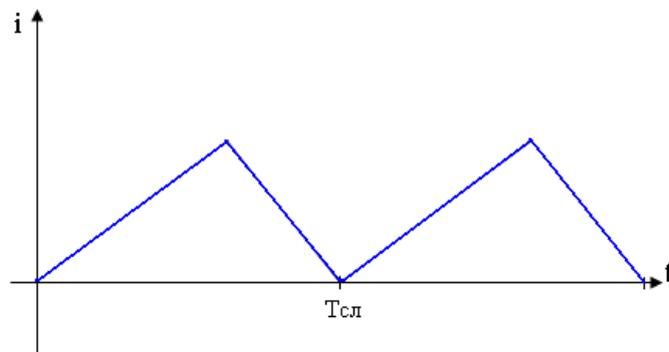


Рисунок 17– Временная диаграмма. Пилообразный сигнал

На временной диаграмме, представленной на рисунке 3, ток меняется по величине и направлению.

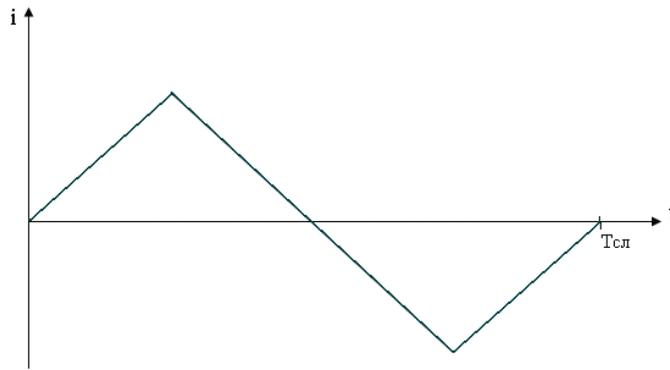


Рисунок 18– Временная диаграмма. Треугольный двухсторонний сигнал

Наибольшее применение в технике связи получил переменный синусоидальный ток, т.е. ток, значения которого изменяются по закону синуса.

Токи, изменяющиеся по закону синуса или косинуса, называются гармоническими.

Простейшим способом получения синусоидальной электродвижущей силы (ЭДС) является вращение рамки с постоянной угловой скоростью в постоянном магнитном поле.

Возникающая электродвижущая сила изменяется по закону:

$$e = \omega \cdot w \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \Psi_e), \quad (1)$$

где  $\omega$  - угловая скорость рамки;

$w$  - число витков;

$\Phi_m$  - максимальный магнитный поток, пронизывающий рамку;

$\Psi_e$  - угол, составленный рамкой с горизонтальной плоскостью в момент времени  $t = 0$ .

Коэффициент перед синусом определяет амплитуду возникающей электродвижущей силы (ЭДС). Амплитуда ЭДС определяется по формуле 2.

$$E_m = \omega \cdot w \cdot \Phi_m \quad (2)$$

Законы изменения гармонического напряжения и тока представлены уравнениями 3 и 4.

$$u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \Psi_u) \quad (3)$$

$$i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \Psi_i) \quad (4)$$

**Рассмотрим основные характеристики гармонических ЭДС,**

**напряжений, токов.**

- Мгновенные значения, т.е. значения в данный момент времени обозначаются маленькими буквами :

-  $e$  – мгновенное значение ЭДС;

-  $u$  – мгновенное значение напряжения;

-  $i$  – мгновенное значение тока.

- Максимальное значение или амплитуда обозначается большими буквами:
  - $E_m$  – амплитуда ЭДС;
  - $U_m$  – амплитуда напряжения;
  - $I_m$  – амплитуда тока.

С круговой частотой ( $\omega$ ) связана частота переменного тока ( $f$ ).

Связь круговой частоты и частоты переменного тока определяется формулой (5).

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f, \quad (5)$$

где  $\omega$  - круговая частота переменного тока, определяется угловой скоростью вращения рамки;

$f$  - частота переменного тока показывает количество периодов в единицу времени;

$T$  - период – величина, обратная частоте.

Связь периода и частоты переменного тока определяется формулой 6:

$$T = \frac{1}{f} \quad (6)$$

- $(\omega \cdot t + \Psi)$  - фаза или аргумент синуса позволяет определить значение величины в данный момент времени. Значение фазы в момент времени  $t=0$  называется начальной фазой и обозначается  $\Psi$ .

Помимо мгновенных и максимальных значений гармонические ЭДС, напряжения, токи характеризуются действующими значениями, которые измеряются амперметрами и вольтметрами.

Действующим значением переменного тока (напряжения) называется постоянный ток (напряжение) эквивалентный переменному по количеству выделяемой тепловой энергии.

- Действующие значения обозначаются большими буквами:
  - $E$  – действующее значение ЭДС;
  - $U$  – действующее значение напряжения;

-  $I$  – действующее значение тока.

**Действующее значение всегда связывают с максимальным значением.**

Для гармонических токов (формула 7) определяет связь действующего значения тока и амплитуды тока:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \cdot I_m \quad (7)$$

Таким образом, действующее значение переменного синусоидального тока меньше его амплитудного значения в  $\sqrt{2}$  раз.

Такое же соотношение справедливо для действующих значений синусоидального напряжения и ЭДС. (формулы 8, 9):

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \cdot U_m \quad (8)$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \cdot E_m \quad (9)$$

Обратные соотношения амплитуды и действующего значения имеют вид:

$$I_m = I \cdot \sqrt{2} = 1.41 \cdot I \quad (10)$$

$$E_m = E \cdot \sqrt{2} = 1.41 \cdot E \quad (11)$$

$$U_m = U \cdot \sqrt{2} = 1.41 \cdot U \quad (12)$$

В уравнениях тока, напряжения, ЭДС коэффициент перед синусом всегда показывает максимальное значение.

**Рассмотрим примеры по определению основных характеристик гармонических ЭДС, напряжений, токов.**

**Пример 1**

Определить амплитуду ( $U_m$ ), действующее значение ( $U$ ), круговую частоту ( $\omega$ ), частоту переменного тока ( $f$ ) и начальную фазу величины ( $\psi$ ), если уравнение напряжения имеет вид:  $u = 120 \cdot \sin(1000 \cdot t + 45^\circ)$  В.

**Решение:**

Коэффициент перед синусом в уравнении напряжения определяет

амплитуду:  $U_m = 120 \text{ В}$ ;

круговая частота ( $\omega$ ) =  $1000 \text{ с}^{-1}$ ;

начальная фаза напряжения ( $\Psi_u$ ) =  $45^\circ$ ;

частоту переменного тока нужно рассчитать по формуле 5:

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{1000}{2 \cdot 3,14} = 159,24 \text{ Гц};$$

период гармонического напряжения следует рассчитать по формуле 6:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{159,24} = 6,28 \text{ мс};$$

действующее значение гармонического напряжения необходимо рассчитать по формуле 9:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{120}{\sqrt{2}} = 85,1 \text{ В}.$$

Чтобы составить уравнение гармонических ЭДС, напряжения, тока необходимо знать **амплитуду, круговую частоту и начальную фазу.**

### **Способы задания синусоидальных величин**

#### **Графическое изображение синусоидальных величин**

Графически гармонические ЭДС, напряжения, токи можно изобразить временной диаграммой или вращающимся вектором.

#### **Временная диаграмма**

Временная диаграмма – график зависимости мгновенных значений ЭДС, напряжения, тока от времени ( $e, u, i = f(t)$ ).

При построении графиков гармонических колебаний принято по оси абсцисс откладывать величину, пропорционально времени  $\omega \cdot t$ . При этом четверти периода будет соответствовать угол -  $90^\circ$ , половине периода соответствует угол -  $180^\circ$ , три четверти периода соответствует угол -  $270^\circ$ , полный период соответствует -  $360^\circ$ .

Порядок построения временной диаграммы:

Необходимо приравнять фазу переменной величины к  $90^\circ$  и определить значение угла  $\omega \cdot t$ , при котором ток (напряжение, ЭДС) принимают максимальное положительное значение.

Указать эту точку на графике.

Временную диаграмму следует построить, используя свойства синусоиды, т.е. изменять значения от максимума до нуля (или от нуля до максимума) через  $90^\circ$ .

Рассмотрим примеры по построению гармонических ЭДС, напряжений, токов на временной диаграмме:

### Пример

Изобразить ток  $i = 2 \cdot \sin(\omega \cdot t + 60^\circ)$  на временной диаграмме.

### Решение:

1. Зная аргумент тока, необходимо рассчитать угол  $\omega \cdot t$ , при котором ток будет принимать максимальное положительное значение.

$$(\omega \cdot t + 60^\circ) = 90^\circ$$

$$\omega \cdot t = 30^\circ$$

2. Угол  $(\omega \cdot t)$  равен  $30^\circ$ , мгновенное значение тока принимает максимальное положительное значение  $2 \text{ А}$ , т.е. амплитуда тока ( $I_m$ )= $2 \text{ А}$ .

3. Точка А на временной диаграмме (рисунок 6) имеет координаты  $(30^\circ; 2 \text{ А})$ .

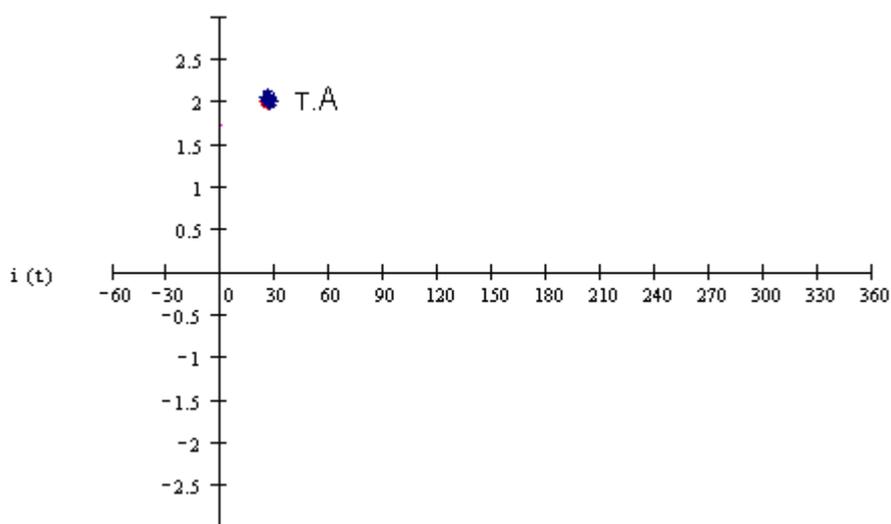


Рисунок 19 – Положительное максимальное значение гармонического тока

4. Временную диаграмму следует построить, используя свойства синусоиды, т.е. изменять значения от максимума до нуля (или от нуля до максимума) через 90°.

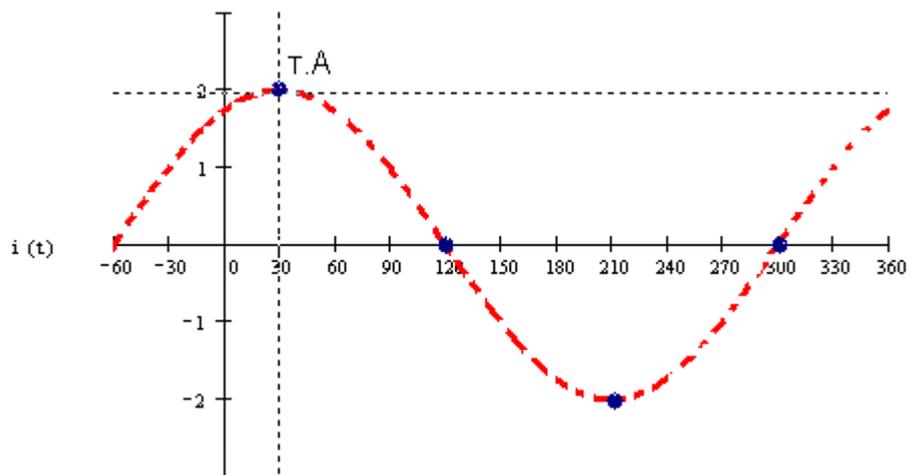


Рисунок 20 – Временная диаграмма переменного синусоидального тока

$$i = 2 \cdot \sin(\omega \cdot t + 60^\circ)$$

### Вращающийся вектор

Синусоидальные ЭДС, напряжения, токи можно изобразить вращающимся вектором. Длина вектора берется равной максимальному или действующему значению ЭДС, напряжения или тока, вектор проводят под углом равным начальной фазе к положительному направлению оси  $ox$ . Радиус-вектор вращается против часовой стрелки, в результате получается синусоидальная развертка. Вектор вращается с угловой скоростью ( $\omega$ ).

Векторная диаграмма - совокупность векторов обязательно одинаковой частоты.

Рассмотрим графический способ изображения синусоидальных величин.

### Пример

Изобразить переменный синусоидальный ток вращающимся вектором, если амплитуда тока 2А; начальная фаза тока 60°.

Решение:

Смотри рисунок 21.



Рисунок 21 –Векторная диаграмма тока

По вектору можно составить уравнение:

1 С помощью линейки нужно измерить длину вектора, умножить на цену деления, т.е.  $4\text{см} \cdot 0,5\text{А} = 2\text{А}$ , следовательно амплитуда тока ( $I_m$ ) равна 2А.

2 С помощью транспортира нужно измерить угол между положительной полуосью X и самим вектором,  $\angle = 60^\circ$ , следовательно начальная фаза тока ( $\Psi$ ) равна  $60^\circ$ .

3 Далее необходимо составить уравнение.

Уравнение имеет вид:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \Psi) \Rightarrow i = 2 \cdot \sin(\omega \cdot t + 60^\circ)$$

### Комплексы синусоидальных ЭДС, напряжений, токов

Из математики известно, что любому вектору на плоскости можно поставить в соответствие комплексное число.

Модуль комплекса ЭДС, напряжения, тока равен длине радиус-вектора (амплитуде или действующему значению величины).

Аргумент комплекса ЭДС, напряжения, тока равен углу, составленному радиус-вектором с положительной полуосью X.

Существуют комплексы максимальных и действующих значений.

Комплексы максимальных значений обозначаются большими буквами с индексом m:  $\underline{E}_m$ ,  $\underline{U}_m$ ,  $\underline{I}_m$ ;

Комплексы действующих значений обозначаются большими буквами :

$$\underline{E}, \underline{U}, \underline{I}.$$

Рассмотрим пример по записи гармонических колебаний комплексами.

### Пример

По векторной диаграмме (рисунок 19) составить комплексы максимального и действующего значения тока.

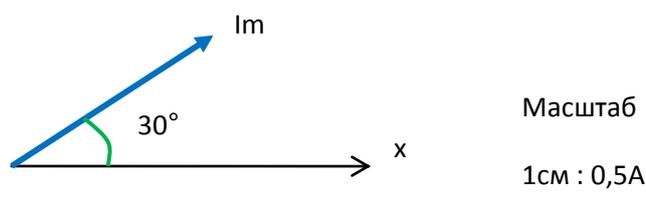


Рисунок 22 – Вектор максимального значения тока.

Решение:

Следует определить длину вектора в сантиметрах (см) и умножить на цену деления:  $4\text{см} \cdot 0,5\text{А} = 2\text{А}$ .

Получим амплитуду тока ( $I_m = 2\text{ А}$ ).

Далее необходимо измерить угол между положительной полуосью X и вектором.

Угол сдвига фаз между вектором и положительной полуосью X равен  $30^\circ$ . Следовательно начальная фаза тока ( $\Psi$ ) равна  $30^\circ$ .

Далее необходимо составить комплекс максимального значения тока:

$$\underline{I}_m = I_m \cdot e^{j\Psi} = 2 \cdot e^{j30^\circ} \text{ А.}$$

Чтобы перейти к комплексу действующего значения тока ( $\underline{I}$ ), необходимо рассчитать действующее значение тока по формуле (7).

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot I_m \Rightarrow I = \frac{2}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot 2 = 2\text{ А}$$

$$\underline{I} = I \cdot e^{j\Psi} = 1,41 \cdot e^{j30^\circ} \text{ А}$$

Итак, существует 4 способа задания переменных синусоидальных ЭДС, напряжения, тока:

1 способ – уравнение:  $e = f(t)$ ,  $u = f(t)$ ,  $i = f(t)$ ;

2 способ – временная диаграмма:  $e = f(t)$ ,  $u = f(t)$ ,  $i = f(t)$ ;

3 способ – вращающийся вектор:  $\overset{\rho}{E}$ ,  $\overset{\rho}{U}$ ,  $\overset{\rho}{I}$ ;

4 способ – комплекс максимальных или действующих значений:  $\underline{E_m}$ ,  $\underline{U_m}$ ,  $\underline{I_m}$ ,  $\underline{E}$ ,  $\underline{U}$ ,  $\underline{I}$ .

### Сложение синусоидальных ЭДС, напряжений, токов с одинаковой частотой

При расчете электрической цепи приходится выполнять действия над синусоидальными ЭДС, напряжениями, токами. Например, если два потребителя включены последовательно, то по второму закону Кирхгофа напряжения складываются, а если параллельно, то по первому закону Кирхгофа складываются токи.

Рассмотрим способы сложения синусоидальных величин.

Сложение временных диаграмм

Для каждого значения  $\omega \cdot t$  мгновенное значение результирующего напряжения следует определить, как алгебраическую сумму мгновенных значений напряжения  $u_1(t)$  и напряжения  $u_2(t)$ .

В результате сложения получается синусоида той же самой частоты. Для составления уравнения напряжения необходимо определить амплитуду напряжения ( $U_m$ ), начальную фазу ( $\Psi$ )

Рассмотрим примеры по сложению гармонических колебаний

одинаковой частоты.

### Пример

Составить уравнение результирующего напряжения полученного в результате сложения напряжений  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ , если напряжение  $u_1(t)$  изменяется по закону:  $u_1 = 60 \cdot \sin(\omega \cdot t + 60^\circ)$ , а напряжение  $u_2(t)$  изменяется по закону:  $u_2 = 80 \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ)$  (рисунок 23).

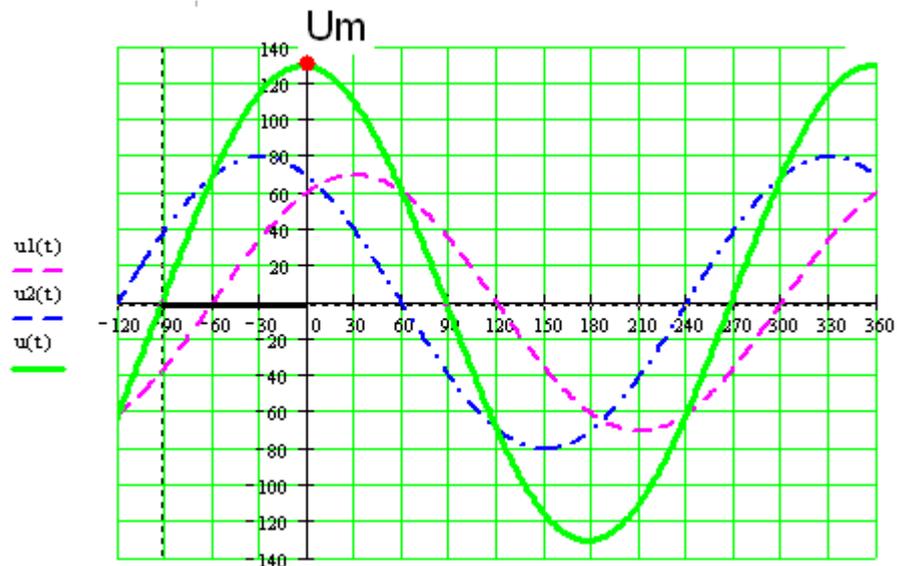


Рисунок 23– Временные диаграммы переменных синусоидальных напряжений

Решение:

По временной диаграмме (рисунок 23) следует определить амплитуду: Максимальное положительное мгновенное значение составляет 127 В.

Определить начальную фазу:

Ток изменяется в первой четверти периода, то начальную фазу следует взять по знаку положительной ( $\Psi > 0$ ). Начальную фазу необходимо определить как расстояние на оси  $\omega \cdot t$  между первым нулем синусоиды и началом координат. Начальная фаза тока равна  $90^\circ$ .

Уравнение результирующего напряжения:

$$u = 127 \cdot \sin(\omega \cdot t + 90^\circ), \text{ В.}$$

### Сложение векторов

Сложение векторов можно производить по правилу параллелограмма или треугольника. Для составления уравнения результирующего напряжения необходимо определить амплитуду ( $U_m$ ), начальную фазу ( $\Psi$ ).

Сложение векторов ( $\vec{U}_m = \vec{U}_{m1} + \vec{U}_{m2}$ ) представлено на векторной диаграмме (рисунок 24).

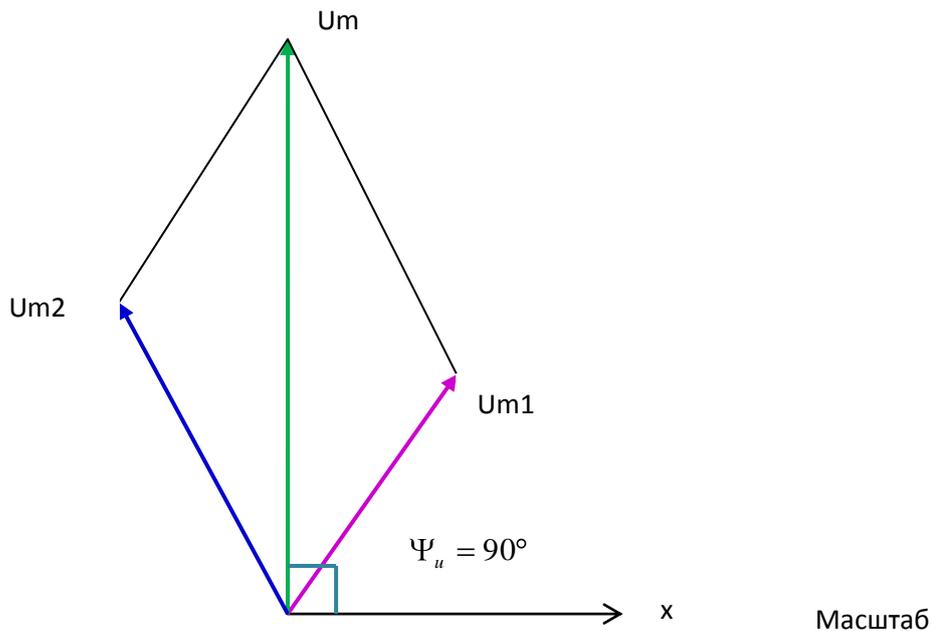


Рисунок 24 – Векторная диаграмма напряжений

### Сложение комплексных величин

Выполним сложение двух напряжений:  $\underline{Um} = \underline{Um}_1 + \underline{Um}_2$ .

При сложении комплексных величин необходимо комплексы максимальных или действующих значений представить в алгебраической форме записи.

Переход в алгебраическую форму записи комплекса  $\underline{Um}_1$ :

$$\underline{Um}_1 = Um_1 \cdot e^{j\Psi_{u1}} = Um_1 \cdot \cos\Psi_{u1} + jUm_1 \cdot \sin\Psi_{u1}, \text{В}$$

Переход в алгебраическую форму записи  $\underline{Um}_2$ :

$$\underline{Um}_2 = Um_2 \cdot e^{j\Psi_{u2}} = Um_2 \cdot \cos\Psi_{u2} + jUm_2 \cdot \sin\Psi_{u2}, \text{В}$$

Комплекс максимального значения напряжения:

$$\begin{aligned} \underline{Um} &= (Um_1 \cdot \cos\Psi_{u1} + jUm_1 \cdot \sin\Psi_{u1}) + (Um_2 \cdot \cos\Psi_{u2} + jUm_2 \cdot \sin\Psi_{u2}) = \\ &= Um \cdot e^{j\psi_u} \end{aligned}$$

Из комплекса максимального значения напряжения  $\underline{Um} = Um \cdot e^{j\psi_u}$ .

Модуль комплекса ( $U_m$ ) равен амплитуде напряжения, аргумент комплекса ( $\Psi_u$ ) равен начальной фазе напряжения.

Далее необходимо составить уравнение результирующего напряжения:

$$u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_u^\circ), \text{ В.}$$

При расчете цепей переменного тока наиболее употребительно сложение векторов и сложение комплексных величин.

### Пример

Выполнить сложение двух напряжений:  $\underline{U}_m = \underline{U}_{m1} + \underline{U}_{m2}$ , если напряжение  $u_1(t)$  изменяется по закону:  $u_1 = 60 \cdot \sin(\omega \cdot t + 60^\circ)$ ,

а напряжение  $u_2(t)$  изменяется по закону:  $u_2 = 80 \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ)$ .

Решение:

Необходимо составить комплекс максимального значения напряжения  $u_1(t)$ :

$$\underline{U}_{m1} = 60 \cdot e^{j60^\circ} \text{ В.}$$

Переход в алгебраическую форму записи комплекса максимального значения напряжения  $\underline{U}_{m1}$ :

$$\underline{U}_{m1} = U_{m1} \cdot \cos \Psi_{u1} + j \cdot U_{m1} \cdot \sin \Psi_{u1} = 60 \cdot \cos 60^\circ + j 60 \cdot \sin 60^\circ = 30 + j 51,96 \text{ В.}$$

Необходимо составить комплекс максимального значения напряжения  $u_2(t)$ :

$$\underline{U}_{m2} = 80 \cdot e^{j120^\circ} \text{ В.}$$

Переход в алгебраическую форму записи комплекса максимального значения напряжения  $\underline{U}_{m2}$ :

$$\underline{U}_{m2} = U_{m2} \cdot \cos \Psi_{u2} + j \cdot U_{m2} \cdot \sin \Psi_{u2} = 80 \cdot \cos 120^\circ + j 80 \cdot \sin 120^\circ = -40 + j 69,28 \text{ В.}$$

Далее следует рассчитать комплекс максимального значения напряжения:

$$\begin{aligned} \underline{U}_m &= (30 + j 51,96) + (-40 + j 69,28) = (30 - 40) + j(51,96 + 69,28) = \\ &= -10 + j 121,24 = \end{aligned}$$

$$= \sqrt{(-10)^2 + 121,24^2} \cdot e^{j180^\circ - \arctg \left| \frac{121,24}{-10} \right|} = 121,65 \cdot e^{j180^\circ - 85,28^\circ} = 122 \cdot e^{j94,72^\circ} \text{ В.}$$

Из комплекса максимального значения напряжения  $\underline{U_m} = 122 \cdot e^{j94,72^\circ}$  В модуль комплекса ( $U_m$ ) равен =122 В, аргумент комплекса ( $\Psi_u$ ) равен  $94,72^\circ$

Уравнение результирующего напряжения имеет вид:  
 $u = 122 \cdot \sin(\omega \cdot t + 94,72^\circ)$  В.

#### Методические указания к решению задачи 4

В электрических цепях, используемых в устройствах связи, сигналы могут иметь различную форму. Расчет цепей упрощается, если сигнал представить в виде суммы гармонических (синусоидальных) колебаний. В линейных цепях гармоническое колебание не изменяется по форме и частоте, поэтому гармоническая форма тока и напряжения позволяет производить расчет на основе метода векторных диаграмм или в комплексной форме. При этом для расчета используются законы Ома и Кирхгофа, записанные в векторной или комплексной форме. Влияние линейных цепей на гармоническое колебание отражают амплитудно – частотные и фазо – частотные характеристики, т.к. при прохождении гармонического колебания через такую цепь могут измениться только амплитуда и начальная фаза колебания, эти изменения зависят от частоты колебания и параметров цепи. При этом под входной характеристикой цепи понимают зависимость комплексного входного сопротивления от частоты:

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U \cdot e^{j\psi_u}}{I \cdot e^{j\psi_i}} = \frac{U}{I} \cdot e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Z_{\text{вх}} \cdot e^{j\varphi_{\text{вх}}}$$

Для того, чтобы исследовать от частоты входную характеристику необходимо виду схемы составить комплексное входное сопротивление цепи, перевести в показательную форму записи, выделить в нем модуль и аргумент. Зависимость модуля комплексного входного сопротивления от частоты ( $Z = f(f)$ ) называют амплитудно – частотной характеристикой (АЧХ). Характеристика показывает отношение напряжения к току на данной частоте. Зависимость аргумента комплексного входного сопротивления от частоты ( $\varphi = f(f)$ ) называют фазо – частотной характеристикой (ФЧХ). Характеристика показывает угол сдвига фаз между напряжением и током на данной частоте.

#### Цепь с резистором и индуктивностью при гармоническом воздействии

В теории электрических цепей под воздействием понимают напряжение на входе цепи, а реакция на воздействие называется откликом или током в цепи.

Рассмотрим цепь с резистором при гармоническом воздействии.

Напряжение и ток в цепи с резистором совпадают по фазе. Если принять начальную фазу напряжения равной нулю, то и начальная фаза тока будет нулевой:

$$u = U_m \cdot \sin \omega \cdot t, \text{ В}$$

$$i = I_m \cdot \sin \omega \cdot t, \text{ А}$$

Векторная диаграмма напряжения и тока строится согласно уравнениям отображена на рисунке 25.



Рисунок 25 - Векторная диаграмма напряжения и тока

В цепи с резистором закон Ома для действующих значений имеет вид:

$$I = \frac{U_R}{R}$$

где  $I, \text{ А}$  – действующее значение тока;

$U_R, \text{ В}$  – действующее значение резистивного напряжения;

$R, \text{ Ом}$  – резистивное сопротивление.

Величина резистивного сопротивления в области низких частот от частоты не зависит (рисунок 14).

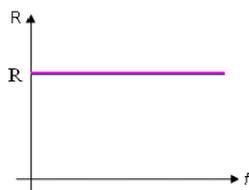


Рисунок 26 - График зависимости  $R = f(f)$

Резистивная мощность в цепи с резистором рассчитывается по формуле:

$$P = U_R \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}, \text{ Вт}$$

Рассмотрим цепь с индуктивностью при гармоническом воздействии.

Индуктивность - энергоемкий элемент, в котором энергия в виде тепла не выделяется, а периодически накапливается в магнитном поле, и затем возвращается к источнику электрической энергии. В цепи с индуктивностью напряжение опережает ток по фазе на угол  $90^\circ$  или ток отстает от напряжения по фазе на угол  $90^\circ$ . Если принять начальную фазу напряжения равной нулю, то ток будет отставать от напряжения по фазе на  $90^\circ$ :

$$u = Um \cdot \sin \omega \cdot t, \text{ В}$$

$$i = Im \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ), \text{ А}$$

Векторная диаграмма напряжения и тока строится согласно уравнениям 22, 23 и отображена на рисунке 15.

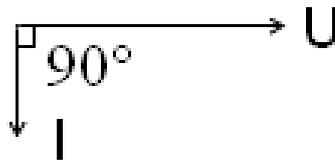


Рисунок 27 - Векторная диаграмма напряжения и тока

Закон Ома для действующих значений тока и напряжения в цепи с индуктивностью имеет вид:

$$I = \frac{U_L}{X_L}$$

где  $I, \text{ А}$  – действующее значение тока;

$U_L, \text{ В}$  – действующее значение индуктивного напряжения;

$X_L, \text{ Ом}$  – индуктивное сопротивление катушки.

Индуктивное сопротивление зависит от частоты и определяется по формуле:

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

где  $\omega, c^{-1}$  – угловая частота;

$L, Гн$  – индуктивность катушки;

$\pi$  – постоянная величина, равна 3,14;

$f, Гц$  – циклическая частота.

Влияние частоты на сопротивление катушки показано на рисунке 28.

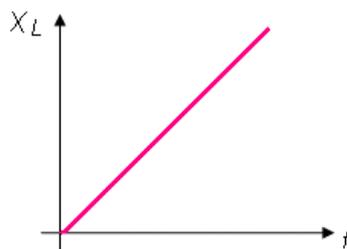


Рисунок 28 - График зависимости  $X_L = f(f)$

Из графика (рисунок 28) следует, что индуктивное сопротивление изменяется прямо пропорционально частоте генератора и индуктивности.

Реактивная индуктивная мощность рассчитывается по формуле:

$$P_{pL} = U_L \cdot I = I^2 \cdot X_L = \frac{U_L^2}{X_L}, \text{ ВАр}$$

Рассмотрим цепь, состоящую из резистора и катушки индуктивности, при гармоническом воздействии (рисунок 17).

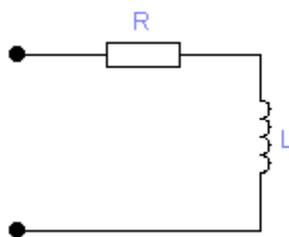


Рисунок 29 - RL-цепь

По второму закону Кирхгофа напряжение, приложенное к цепи, определяется:

$$u = u_L + u_R$$

Напряжение на входе цепи определим векторным способом как сумму векторов индуктивного и резистивного напряжения:

$$\vec{U} = \vec{U}_L + \vec{U}_R$$

Векторная диаграмма напряжений и тока изображена на рисунке 30:

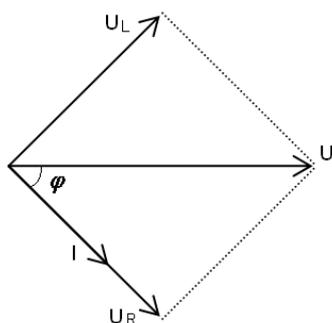


Рисунок 30 - Векторная диаграмма напряжений и тока

Из векторной диаграммы следует, ток в RL - цепи отстает от напряжения по фазе на угол  $\varphi$ , который с увеличением частоты генератора возрастает от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

Если принять начальную фазу напряжения равной нулю, то ток будет отставать от напряжения по фазе на угол  $\varphi$ :

$$u = Um \cdot \sin \omega \cdot t$$

$$i = Im \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi^\circ)$$

Закон Ома для действующих значений тока и напряжения в RL – цепи имеет вид:

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

где  $I, A$  – действующее значение тока;

$U, B$  – действующее значение напряжения на входе цепи;

$Z, Ом$  – полное сопротивление цепи.

Полное сопротивление цепи зависит от частоты и определяется по формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}$$

Зависимость полного сопротивления от частоты ( $\omega$ ) показана на рисунке 31.

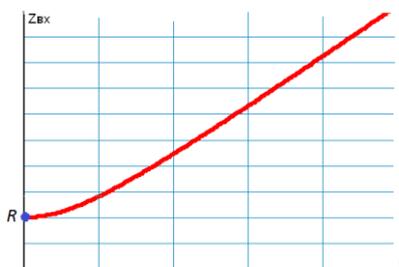


Рисунок 31 - График зависимости  $Z = f(f)$

При изменении частоты от 0 до  $\infty$  полное сопротивление цепи возрастает от R до  $\infty$ .

Угол сдвига фаз между напряжением и током на входе цепи зависит от частоты и определяется по формуле:

$$\varphi = \arctg \frac{\omega \cdot L}{R}$$

Зависимость угла фазового сдвига между напряжением и током от частоты показана на рисунке 32.

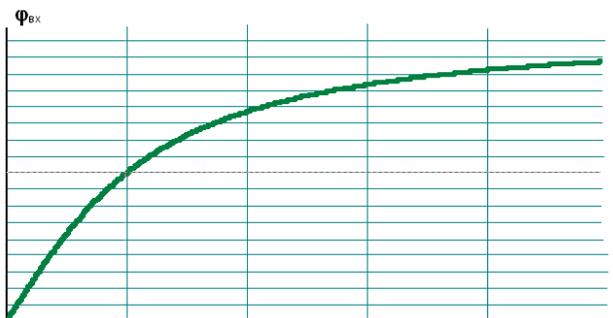


Рисунок 32 - График зависимости  $\varphi = f(f)$

При изменении частоты от 0 до  $\infty$  угол сдвига фаз между напряжением и током возрастает от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

Полная мощность цепи рассчитывается по формуле:

$$P_s = U \cdot I = I^2 \cdot Z = \sqrt{P^2 + P_{pL}^2}, \text{ ВА}$$

где  $P$ , Вт - резистивная мощность;

$P_{pL}$ , ВАр - реактивная индуктивная мощность.

### Цепь с резистором и емкостью при гармоническом воздействии

Рассмотрим цепь с емкостью при гармоническом воздействии.

Емкость – энергоемкий элемент, в котором энергия в виде тепла не выделяется, а периодически накапливается в электрическом поле в диэлектрике конденсатора, и затем возвращается к источнику электрической энергии.

Прибор, обладающий электроемкостью, называется конденсатором.

В цепи с емкостью напряжение отстает от тока по фазе на угол  $90^\circ$  или ток опережает напряжение на угол  $90^\circ$ . Если принять начальную фазу напряжения равной нулю, то ток будет опережать напряжение по фазе на  $90^\circ$ :

$$u = Um \cdot \sin \omega \cdot t, \text{ В}$$

$$i = Im \cdot \sin(\omega \cdot t + 90^\circ), \text{ А}$$

Векторная диаграмма напряжения и тока строится согласно уравнениям 35, 36 и отображена на рисунке 33.



Рисунок 33 – Векторная диаграмма напряжения и тока

В цепи с емкостью закон Ома для действующих значений имеет вид:

$$I = \frac{U_c}{X_c}$$

где  $I, A$  – действующее значение тока;

$U_c, B$  – действующее значение емкостного напряжения;

$X_c, Ом$  – емкостное сопротивление конденсатора.

Емкостное сопротивление зависит от частоты и определяется по формуле:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

где  $\omega, c^{-1}$  – угловая частота;

$C, мкФ$  – емкость конденсатора;

$\pi$  – постоянная величина, равна 3,14;

$f, Гц$  – циклическая частота.

Влияние частоты генератора на емкостное сопротивление показано на рисунке 34.

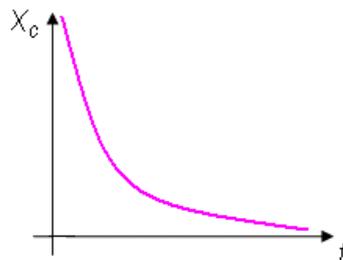


Рисунок 34 – График зависимости  $X_c = f(f)$

Из графика (рисунок 34) следует, что емкостное сопротивление изменяется обратно пропорционально частоте генератора и величине емкости.

Реактивная емкостная мощность рассчитывается по формуле:

$$P_{pc} = U_c \cdot I = I^2 \cdot X_c = \frac{U_c^2}{X_c}, \text{ ВАр}$$

Рассмотрим цепь из резистора и емкости при гармоническом воздействии.

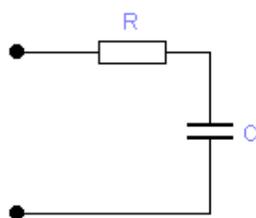


Рисунок 35 – RC-цепь

По второму закону Кирхгофа напряжение, приложенное к цепи, определяется:

$$u = u_C + u_R$$

Напряжение на входе цепи определяется векторным способом как сумма векторов емкостного и резистивного напряжения:

$$\vec{U} = \vec{U}_C + \vec{U}_R$$

Векторная диаграмма напряжений и тока изображена на рисунке 36:

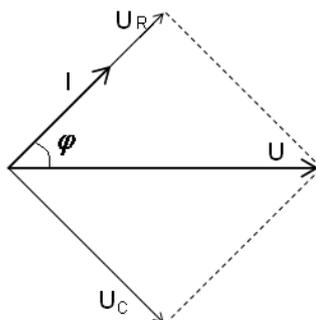


Рисунок 36 – Векторная диаграмма напряжения и тока

Из векторной диаграммы следует, что ток в RC цепи опережает напряжение по фазе на угол  $\varphi$ , который с увеличением частоты генератора уменьшается от  $90^\circ$  до  $0^\circ$ .

Если принять начальную фазу напряжения равной нулю, то ток будет опережать напряжение по фазе на угол  $\varphi$ :

$$u = Um \cdot \sin \omega \cdot t$$

$$i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi^\circ)$$

Закон Ома для действующих значений тока и напряжения в RC – цепи имеет вид:

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

где  $I, A$  – действующее значение тока;

$U, B$  – действующее значение напряжения на входе цепи;

$Z, Ом$  – полное сопротивление цепи.

Полное сопротивление цепи зависит от частоты и определяется по формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

Зависимость полного сопротивления от частоты показана на рисунке 37.

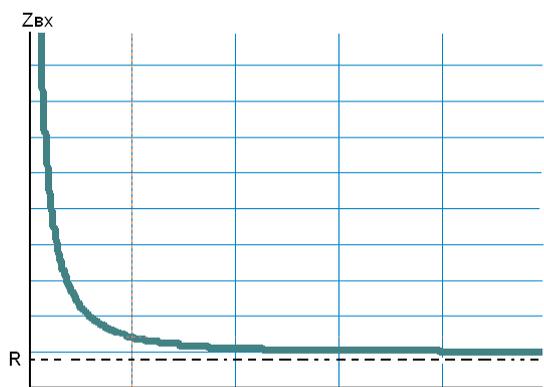


Рисунок 37 – График зависимости  $Z = f(f)$

При изменении частоты от 0 до  $\infty$  полное сопротивление уменьшается от  $\infty$  до  $R$ . Угол сдвига фаз между напряжением и током на входе цепи зависит от частоты и определяется по формуле:

$$\varphi = -\arctg \frac{1}{R \cdot \omega \cdot C}$$

Знак «минус» означает, что напряжение отстает от тока или ток опережает напряжение по фазе.

Зависимость фазового сдвига между напряжением и током от частоты показана на рисунке 38.

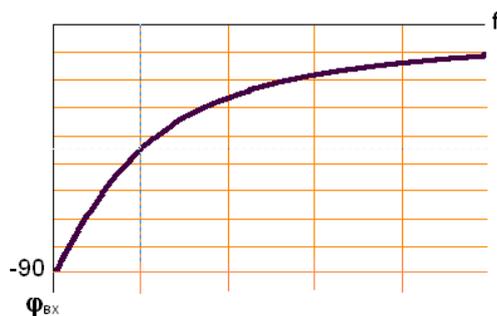


Рисунок 38 – График зависимости  $\varphi=f(f)$

Полная мощность цепи рассчитывается по формуле:

$$P_s = U \cdot I = I^2 \cdot Z = \sqrt{P^2 + P_{pC}^2}, \text{ ВА}$$

где  $P$ , Вт – резистивная мощность;

$P_{pC}$ , ВАр – реактивная емкостная мощность.

### Последовательная RLC – цепь при гармоническом воздействии

Рассмотрим цепь из резистора, катушки индуктивности и емкости при изменении частоты генератора в пределах от нуля до бесконечности.

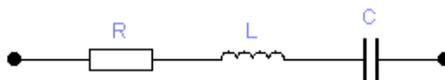


Рисунок 39 – RLC-цепь при гармоническом воздействии

Так как индуктивное и емкостное сопротивление зависят от частоты (рисунок 39), то при последовательном соединении элементов цепи при изменении частоты генератора от 0 до  $\infty$  **возможны три случая:**

1. В диапазоне частот от 0 до  $f_0$  преобладает емкостное сопротивление  $X_L < X_C$
2. На частоте генератора  $f_0$  индуктивное сопротивление равно емкостному сопротивлению  $X_{L0} = X_{C0}$
3. В диапазоне частот от  $f_0$  до  $\infty$  преобладает индуктивное сопротивление  $X_L > X_C$

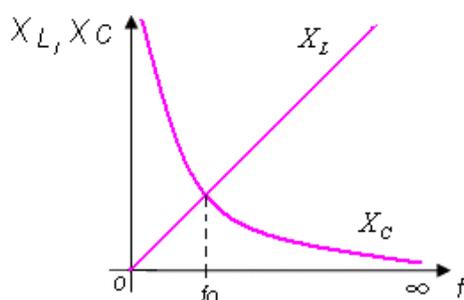


Рисунок 39 – График зависимости  $X_L, X_C = f(f)$

**Рассмотрим все три случая подробнее.**

**1.** При изменении частоты генератора от нуля до  $f_0$  ( $0 \dots f_0$ )  $X_L < X_C \Rightarrow$  реактивное сопротивление носит емкостной характер  $X_P = X_L - X_C < 0$ . Характер цепи резистивно – емкостной. Схема замещения цепи имеет вид:

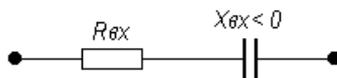


Рисунок 40 – Схема замещения RLC – цепи при  $X_L < X_C$

В данном диапазоне частот индуктивное напряжение меньше емкостного напряжения  $U_L < U_C$ , т.к. напряжение изменяется прямо пропорционально сопротивлению:  $U_L = I \cdot X_L$ ,  $U_C = I \cdot X_C$ . Ток опережает напряжение по фазе на угол  $\varphi$ , причем угол  $\varphi < 0$ . На рисунке 30 построена векторная диаграмма для случая, когда  $X_L < X_C$ .

**По векторной диаграмме для каждого конкретного случая проверяется выполнение второго закона Кирхгофа:  $\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$**

или  $\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_p$ .

По первому закону Кирхгофа ток на входе цепи равен:  $\vec{I} = \vec{I}_R = \vec{I}_L = \vec{I}_C$

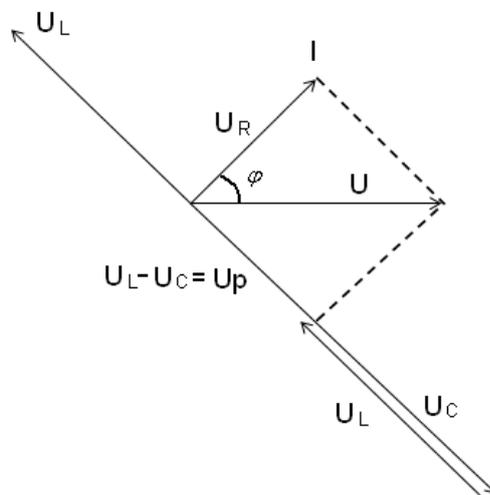


Рисунок – 41 – Векторная диаграмма для случая  $X_L < X_C$ .

2. В случае, когда частота генератора совпадает с частотой  $f_0$  ( $f = f_0$ )  $X_{L0} = X_{C0} \Rightarrow$  реактивное сопротивление равно нулю  $X_p = X_L - X_C = 0 \Rightarrow$  цепь носит резистивный характер. Схема замещения цепи имеет вид:

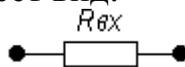


Рисунок 42 – Схема замещения RLC – цепи при  $X_{L0} = X_{C0}$

На частоте  $f_0$  напряжения реактивных элементов равны  $U_{L0} = U_{C0}$ , т.к.  $X_{L0} = X_{C0}$ , а ток совпадает по фазе с напряжением, т.е.  $\varphi = 0$ . На рисунке 43 построена векторная диаграмма для случая, когда  $X_{L0} = X_{C0}$ .

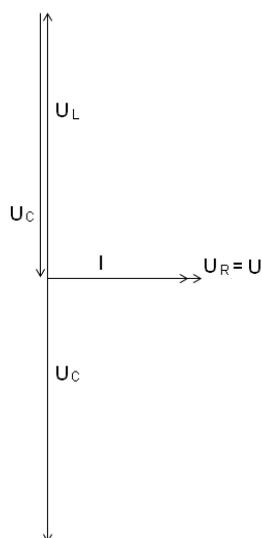


Рисунок – 43 – Векторная диаграмма для случая  $X_{L0} = X_{C0}$ .

3. При изменении частоты от  $f_0$  до бесконечности ( $f_0 \dots \infty$ )  $X_L > X_C \Rightarrow$  реактивное сопротивление носит индуктивный характер  $X_p = X_L - X_C > 0 \Rightarrow$  на входе цепи характер резистивно – индуктивный. Схема замещения цепи имеет вид:



Рисунок 44 – Схема замещения RLC – цепи при  $X_L < X_C$

При данном условии  $U_L > U_C$ , а ток отстает от напряжения по фазе на угол  $\varphi$ , причем угол  $\varphi > 0$ . На рисунке 45 построена векторная диаграмма для случая, когда  $X_L > X_C$ .

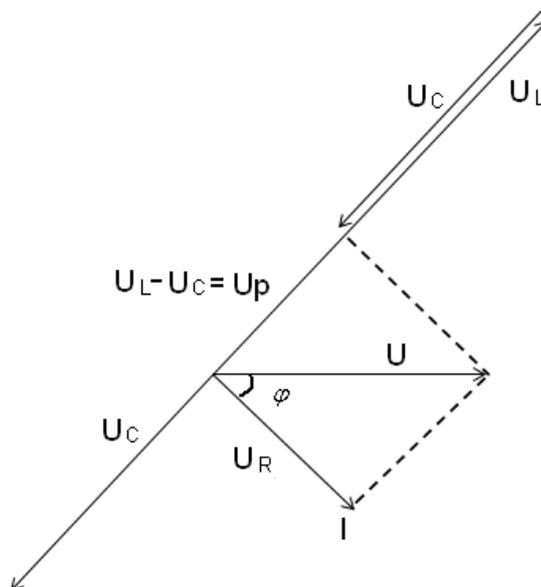


Рисунок – 45 – Векторная диаграмма для случая  $X_L > X_C$ .

Закон Ома для действующих значений в RLC – цепи имеет вид:

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

где  $I, A$  – действующее значение тока;

$U, B$  – действующее значение напряжения на входе цепи;

$Z, Ом$  – полное сопротивление цепи.

Полное сопротивление цепи зависит от частоты и определяется по формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C})^2}$$

При изменении частоты от 0 до  $f_0$  полное сопротивление уменьшается, при  $f = f_0$  полное сопротивление минимальное ( $Z = R$ ), а при изменении частоты от  $f_0$  до  $\infty$  полное сопротивление увеличивается от  $R$  до  $\infty$ .

Это демонстрирует амплитудно – частотная характеристика для последовательной RLC – цепи на рисунке 46.

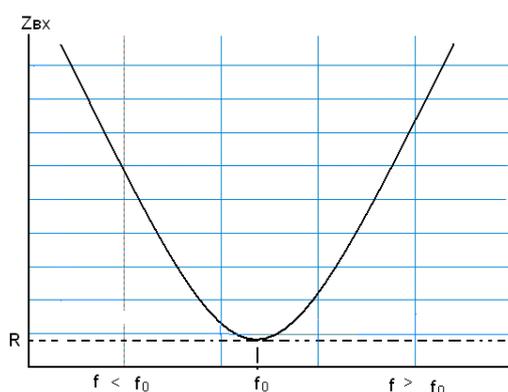


Рисунок 46 – АЧХ последовательной RLC – цепи

Угол сдвига фаз между напряжением и током на входе цепи зависит от частоты и определяется по формуле:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R}$$

Если угол  $\varphi$  имеет знак «минус», это означает, что характер цепи резистивно – емкостной.

Если угол  $\varphi$  равен нулю, то характер цепи резистивный.

Если угол  $\varphi$  имеет знак «плюс», это означает, что характер цепи резистивно – индуктивный.

На частоте генератора  $f = 0$  характер цепи емкостной, а на  $f = \infty$  характер цепи индуктивный.

Фазо – частотная характеристика RLC – цепи показана на рисунке 47.

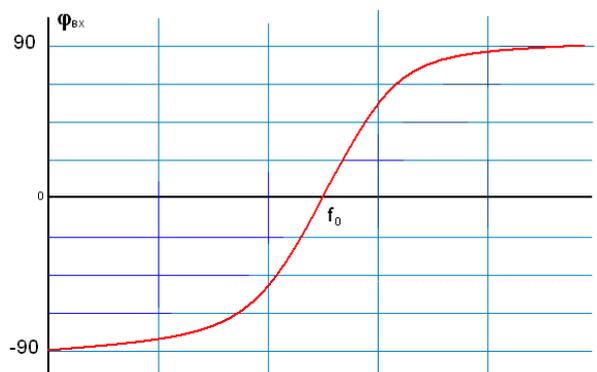


Рисунок 47 – зависимость  $\varphi = f(f)$

Полная мощность цепи рассчитывается по формуле:

$$P_s = U \cdot I = I^2 \cdot Z = \sqrt{P^2 + (P_{pL} - P_{pC})^2}, \text{ ВА}$$

### Методические указания к решению задачи 5

#### Воздействие и отклик в линейных цепях при негармоническом воздействии

Напряжение и ток, которые изменяются не по закону синуса и косинуса, называются негармоническими.

Периодические негармонические напряжения и токи, представленные выражениями 1, 2 раскладываются в тригонометрический ряд Фурье и состоят из постоянной составляющей и синусоидальных колебаний, каждое из которых называется гармоникой:

$$u(t) = U_0 + \sum U_{mn} \cdot \sin(n\omega_1 t + \psi_n) \quad (1)$$

$$i(t) = I_0 + \sum I_{mn} \cdot \sin(n\omega_1 t + \psi_n) \quad (2)$$

где  $U_0, I_0$  – постоянные составляющие напряжения и тока,

$U_{mn}, I_{mn}$  – амплитуды  $n$  – гармоник напряжения и тока,

$\omega_1$  - частота первой гармоники,

$\psi_n$  - начальная фаза  $n$  – гармоники.

Каждая гармоника из разложения в ряд Фурье, характеризуется амплитудой, частотой и начальной фазой.

Негармоническое напряжение, поданное на вход электрической цепи, называется воздействием.

Подать на вход цепи негармоническое напряжение- это значит одновременно подать все гармонические составляющие напряжения из ряда Фурье.

Ток, возникающий на входе цепи при поданном напряжении, называется откликом.

Рассмотрим отклик в линейных электрических цепях, т.е. в цепях содержащих только линейные идеальные элементы: резистор, катушку индуктивности и конденсатор, параметры (R,L,C) которых не зависят от напряжения, тока и времени.

Отклик определяется методом суперпозиции, т.е. входной ток равен сумме токов от всех составляющих напряжения. Для составления уравнения тока для каждой гармоники необходимо определить ее амплитуду и начальную фазу.

### **Расчет неразветвленной RLC - цепи при негармоническом воздействии**

При расчете линейной цепи при негармоническом воздействии следует помнить:

- электрическая цепь рассчитывается столько раз, сколько гармонических составляющих в разложении напряжения, поданного на вход цепи;

- так как в линейных цепях не происходит искажения гармонического напряжения, то отклик содержит столько же составляющих, сколько их в воздействии. Однако форма тока в общем случае отлична от формы напряжения, вследствие разного соотношения амплитуд в разложении воздействия и отклика.

- Искажения, возникающие в линейных цепях, называется частотными линейными искажениями.

- если входное напряжение содержит постоянную составляющую ( $U_0$ ), то в цепи содержащей конденсатор, постоянная составляющая тока  $I_0 = 0$ , так как конденсатор не пропускает постоянный ток.

- В R - и RL – цепях постоянная составляющая тока есть, и она определяется по формуле:

$$I_0 = \frac{U_0}{R}$$

## Расчет в общем виде

Пусть уравнение напряжения поданного на вход неразветвленной RLC – цепи имеет вид:

$$u(t) = U_0 + U_{m1} \cdot \sin(\omega_1 t + \psi_1) + U_{m2} \cdot \sin(2\omega_1 t + \psi_2) + U_{m3} \cdot \sin(3\omega_1 t + \psi_3) + \dots + U_{mn} \cdot \sin(n\omega_1 t + \psi_n)$$

Определить: действующие значения напряжения, тока ( $U$ ,  $I$ ); коэффициент гармоник ( $K_{ги}$ ,  $K_{гi}$ ), резистивную мощность ( $P$ ), составить уравнение тока  $i(t)$ .

Порядок расчета:

1  $I_0 = 0$ , так как цепь содержит емкость.

2 Следует рассчитать первую гармонику, используя символический метод.

$$\underline{U}_{m1} = U_{m1} \cdot e^{j\psi_{u1}}$$

$$\underline{I}_{m1} = \frac{\underline{U}_{m1}}{\underline{Z}_1}$$

$$\underline{Z}_1 = R + jX_{L1} - jX_{C1} = \underline{Z}_1 \cdot e^{j\varphi_1}$$

$$\underline{I}_{m1} = \frac{U_{m1} e^{j\psi_{u1}}}{\underline{Z}_1 e^{j\varphi_1}} = I_{m1} e^{j\psi_{i1}} \Rightarrow i_1 = I_{m1} \sin(\omega_1 t + \psi_{i1})$$

3 Аналогично рассчитываются гармоники высших порядков:

$$u_n = U_{mn} \sin(n\omega_1 t + \psi_{un})$$

$$\underline{U}_{mn} = U_{mn} \cdot e^{j\psi_{un}}$$

$$\underline{Z}_n = R + jX_{Ln} - jX_{Cn} = \underline{Z}_n \cdot e^{j\varphi_n}$$

$$X_{Ln} = n\omega_1 L$$

$$X_{Cn} = \frac{1}{n\omega_1 C}$$

$$\underline{I}_{mn} = \frac{U_{mn} \cdot e^{j\psi_{un}}}{\underline{Z}_n \cdot e^{j\varphi_n}} = I_{mn} \cdot e^{j\psi_{in}} \Rightarrow i_n = I_{mn} \sin(n\omega_1 t + \psi_{in})$$

4 Уравнение тока на входе цепи имеет вид:

$$i(t) = I_{m1} \cdot \sin(\omega_1 t + \psi_{i1}) + I_{m2} \cdot \sin(2\omega_1 t + \psi_{i2}) + \dots + I_{mn} \cdot \sin(n\omega_1 t + \psi_{in})$$

5 Действующие значения напряжения и тока в цепи определяются по формулам (17, 18):

$$U = \sqrt{U_0^2 + \frac{U_{m1}^2 + U_{m2}^2 + \dots + U_{mn}^2}{2}}$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{m1}^2 + I_{m2}^2 + \dots + I_{mn}^2}{2}}$$

6 Коэффициенты гармоник рассчитываются по формулам:

$$K_{\Gamma_u} = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots + U_{mn}^2}}{U_{m1}}$$

$$K_{\Gamma_i} = \frac{\sqrt{I_{m2}^2 + I_{m3}^2 + \dots + I_{mn}^2}}{I_{m1}}$$

7 Резистивная мощность определяется, как сумма резистивных мощностей всех гармоник:

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_n,$$

где  $P_0 = U_0 \cdot I_0$ ;

$$P_n = U_n \cdot I_n \cos \varphi_n = \frac{U_{mn} \cdot I_{mn}}{2} \cdot \cos \varphi_n = 0,5 U_{mn} I_{mn} \cos \varphi_n.$$

## 5. Задания для выполнения контрольной работы

### Задача 1

#### Расчет цепей со смешанным соединением резисторов

В цепи со смешанным соединением резисторов рассчитать входное сопротивление цепи ( $R_{вх}$ ), токи в ветвях, напряжение на входе цепи, ЭДС. Данные для расчёта взять из таблицы 1. Составить баланс мощностей для проверки правильности расчета.

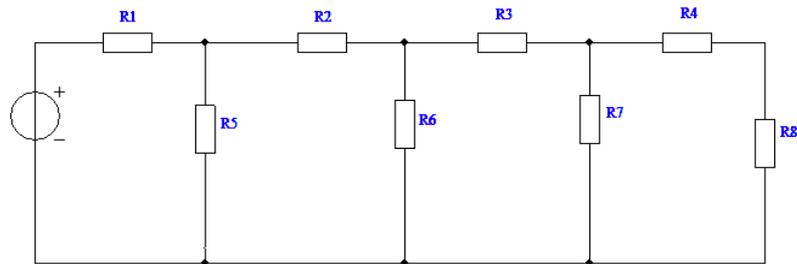


Рисунок 1 - Схема электрическая

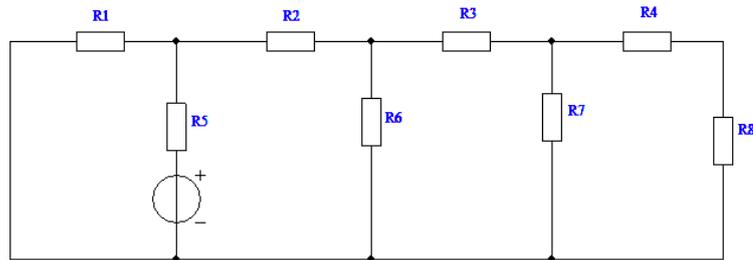


Рисунок 2 - Схема электрическая

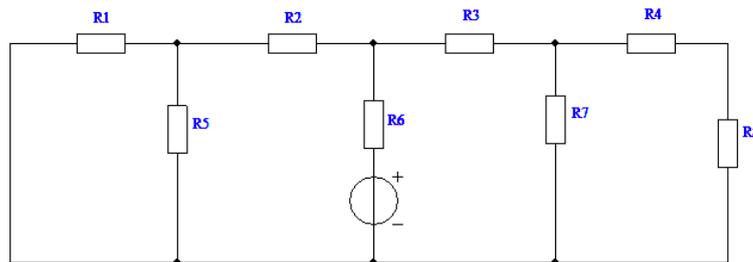


Рисунок 3 - Схема электрическая

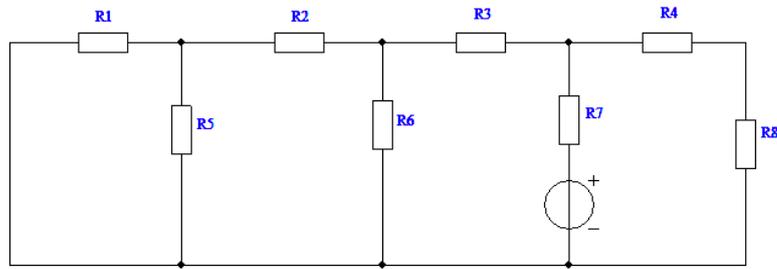


Рисунок 4 - Схема электрическая

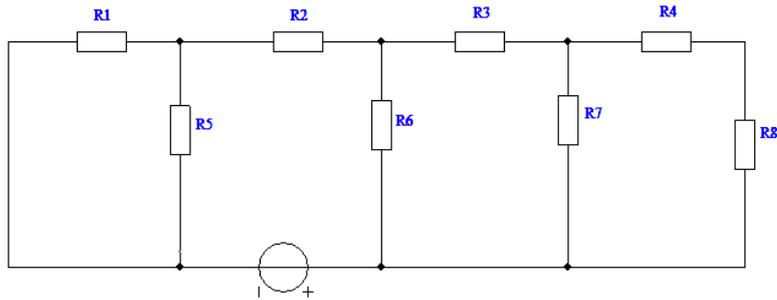


Рисунок 5 - Схема электрическая

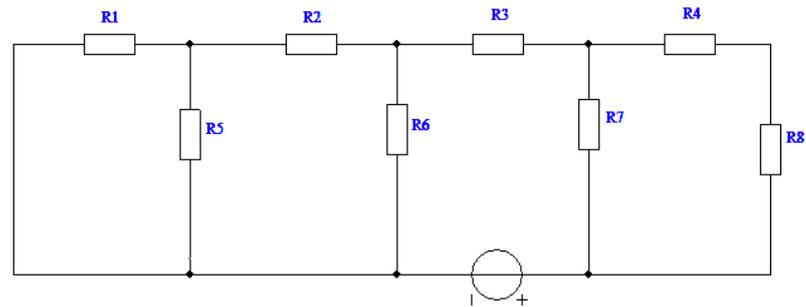


Рисунок 6 - Схема электрическая

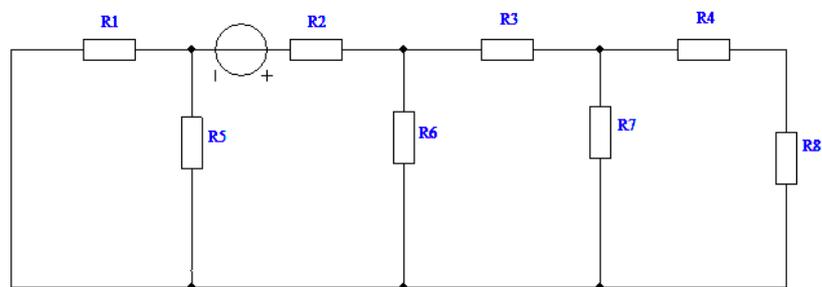


Рисунок 7 - Схема электрическая

Таблица 1 - Исходные данные

Вариант №	Рисунок №	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом	R5, Ом	R6, Ом	R7, Ом	R8, Ом	Данные для расчета
1	1	4	4	4	4	15	15	12	8	$I_1 = 1, \text{ A}$
2	2	30	4	4	4	15	15	12	8	$U_5 = 6, \text{ B}$
3	3	10	4	4	4	15	15	12	8	$I_6 = 2, \text{ A}$
4	4	10	9	14	3	15	10	12	2	$U_3 = 2.8, \text{ B}$
5	5	30	10	10	16	15	26	48	8	$U_2 = 30, \text{ B}$
6	6	10	6	14	6	15	12	14	8	$I_7 = 0.5, \text{ A}$
7	7	10	6	8	6	15	12	14	8	$I_2 = 2,7, \text{ A}$
8	1	4	4	4	4	15	15	12	8	$I_5 = 0,4, \text{ A}$
9	2	30	4	4	4	15	15	12	8	$I_2 = 0.3, \text{ A}$
10	3	10	4	4	4	15	15	12	8	$U_3 = 4, \text{ B}$

## Задача 2

### Расчёт сложных резистивных цепей

2.1 Определить токи в ветвях сложной цепи методом уравнений Кирхгофа. Данные для расчёта взять из таблицы 1.

2.2 Составить баланс мощностей для проверки правильности расчета.

2.3 Определить токи в ветвях той же цепи методом контурных токов.

2.4 Определить токи в ветвях той же цепи методом наложения.

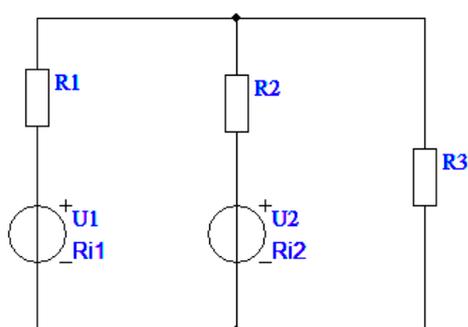


Рисунок 1 - Схема электрическая для вариантов 1,3,5,7,9

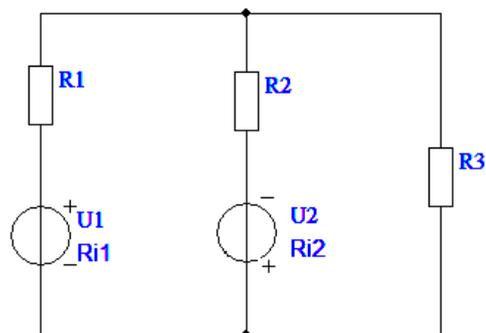


Рисунок 2 - Схема электрическая для вариантов 2,4,6,8,10

Таблица 1 - Исходные данные

Вариант	E1,В	E2,В	Ri1,Ом	Ri2,Ом	R1,Ом	R2,Ом	R3,Ом
1	12	8	1	1	5	5	6
2	10	15	1	1	4	4	5
3	20	12	2	2	8	8	10
4	15	10	1	1	7	7	8
5	24	16	2	2	10	10	12
6	20	30	2	2	16	16	20
7	40	24	4	4	16	16	20
8	30	20	2	2	14	14	16
9	8	12	2	2	10	10	12
10	15	10	2	2	8	8	10

### Задача 3

#### Графическое изображение синусоидальных напряжений и токов

3.1 Составить уравнения токов (напряжений) по исходным данным таблицы 1, 2. Изобразить токи (напряжения) на временной, векторной диаграмме. Записать комплексы максимальных значений напряжений (токов),

3.2 Выполнить сложение напряжений (токов) на временной диаграмме, записать уравнение результирующего напряжения (тока).

3.3 Выполнить сложение напряжений (токов) векторным способом, записать уравнение результирующего напряжения (тока).

3.4 Выполнить сложение комплексов напряжений (токов), записать уравнение результирующего напряжения (тока).

3.5 Сравнить результаты сложения в трех случаях, сделать вывод.

Таблица 1 - Исходные данные

Вариант	I1, А	I2, А	$\psi1,^\circ$	$\psi2,^\circ$	T, мс
1	3	4	30	120	3,14
3	2	4	60	-60	6,28
5	4	3	45	-45	9,42

Продолжение таблицы 1

Вариант	$I_1, A$	$I_2, A$	$\psi_1, ^\circ$	$\psi_2, ^\circ$	$T, мс$
7	8	6	120	30	12,56
9	3	4	150	50	3,14

Таблица 2 - Исходные данные

Вариант	$U_1, В$	$U_2, В$	$\psi_1, ^\circ$	$\psi_2, ^\circ$	$T, мс$
2	60	80	-30	60	3,14
4	20	40	60	-45	6,28
6	100	120	-45	-90	9,42
8	50	90	45	135	12,56
10	70	90	-180	90	3,14

### Задача 4

#### Расчет цепей переменного тока

4.1 Рассчитать цепь с последовательным соединением резистора (R), катушки индуктивности (L) и конденсатора (C). (рисунок 1)

4.1.1 Рассчитать угол сдвига фаз между напряжением и током, токи, напряжение на всех элементах, напряжение на входе цепи. Данные для расчёта взять из таблицы 1.

4.1.2 Составить уравнения напряжения и токов.

4.1.3 Построить векторную диаграмму (в масштабе).

4.1.4 Привести схему замещения цепи на входе, сделать вывод о характере цепи.

4.1.5 Рассчитать резистивную, реактивную, полную мощность цепи.

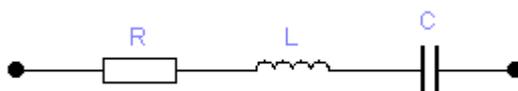


Рисунок 1 – RLC-цепь

4.2 Рассчитать цепь с параллельным соединением RL и RC (рисунок 2).

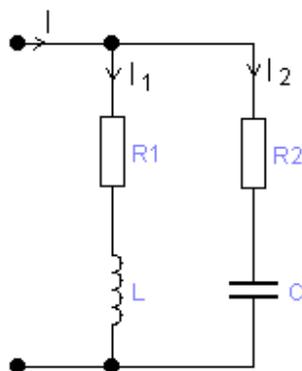


Рисунок 2 – RLC – цепь

4.2.1 Рассчитать ток в  $RL$  – ветви, ток в  $RC$  – ветви, фазовый сдвиг между напряжением и током в  $RL$  – ветви, фазовый сдвиг между напряжением и током в  $RC$  – ветви ( $\varphi_2$ ). Данные для расчёта взять из таблицы 2. Во всех вариантах  $U_{\text{мвх}}=10 \text{ В}$ ,  $\psi_{U_{\text{мвх}}} = 0^\circ$ .

4.2.2 Ток до разветвления рассчитать по I закону Кирхгофа графически с помощью векторной диаграммы (в масштабе).

4.2.3 По векторной диаграмме определить фазовый сдвиг между напряжением и током на входе цепи.

Таблица 1 - Исходные данные

Вариант	Индуктивное сопротивление, $X_L, \text{Ом}$	Емкостное сопротивление, $X_C, \text{Ом}$	Резистивное сопротивление, $R, \text{Ом}$	Уравнение
1	100	150	70	$u = 10 \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ)$
2	160	90	30	$u_R = 6 \cdot \sin(\omega \cdot t + 50^\circ)$
3	110	160	20	$i = 2 \cdot \sin(\omega \cdot t - 45^\circ)$
4	170	80	50	$u_L = 8 \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ)$
5	120	180	30	$u_c = 6 \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ)$
6	150	120	80	$u = 10 \cdot \sin(\omega \cdot t + 180^\circ)$
7	80	190	60	$u_R = 3 \cdot \sin(\omega \cdot t - 60^\circ)$
8	150	70	40	$i = 1 \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ)$
9	50	80	50	$u_L = 10 \cdot \sin(\omega \cdot t - 30^\circ)$
10	200	180	20	$u_c = 6 \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ)$

Таблица 2 - Исходные данные

Вариант	Резистивное сопротивление, R1, Ом	Индуктивное сопротивление, XL1, Ом	Резистивное сопротивление, R2, Ом	Емкостное сопротивление, XC, Ом
1	40	100	30	140
2	75	105	34	150
3	20	84	10	60
4	32	90	12	120
5	60	150	35	110
6	20	180	35	200
7	35	80	23	90
8	51	147	32	169
9	51	84	32	169
10	40	86	23	50

### Задача 5

#### Расчет электрической цепи при негармоническом воздействии

5.1 Рассчитать отклик цепи при воздействии негармонической формы:

$$u(t) = U_{m1} \cdot \sin(\omega_1 t + \psi_1) + U_{m3} \cdot \sin(3\omega_1 t + \psi_3) + U_{m5} \cdot \sin(5\omega_1 t + \psi_5)$$

Данные для расчёта взять из таблицы 1. Частота первой гармоники во всех вариантах  $\omega=1000\text{с}^{-1}$ . Начальные фазы всех гармоник равны 0.

- 5.2 Построить временные диаграммы воздействия и отклика.
- 5.3 Построить спектры воздействия и отклика.
- 5.4 Рассчитать действующие значения напряжения, тока.
- 5.5 Рассчитать коэффициенты гармоник напряжения, тока.
- 5.4 Сделать вывод.

Таблица 1 – Исходные данные

Вариант	Амплитуды гармоник входного напряжения			R, Ом	L, мГн	C, мкФ
	Um1, В	Um3, В	Um5, В			
1	12	4	2,4	20	25	12,5
2	15	5	3	40	30	17,5
3	9	3	1,8	30	40	7,5

Продолжение таблицы 1

Вариант	Амплитуды гармоник входного напряжения			R, Ом	L, мГн	C, мкФ
	Um1, В	Um3, В	Um5, В			
4	18	6	3,6	25	20	25
5	6	2	1,2	50	15	33,3
6	3	1	0,6	35	28	20
7	4,5	1,5	0,9	45	25	20
8	12	4	2,4	55	35	10
9	9	3	1,8	60	50	25
10	6	2	1,2	28	45	7,5

## 6. Экзаменационные вопросы по дисциплине ОП.01 Теория электрических цепей

### *Вопросы к экзамену по Теории электрических цепей*

- 1 Электрическое поле. Напряженность. Потенциал. Напряжение.
- 2 Электрическая емкость. Конденсаторы.
- 3 Соединения конденсаторов. Основные соотношения для зарядов, напряжений и емкостей.
- 4 Электрическая цепь и ее элементы.
- 5 Источники электрической энергии, их характеристики.
- 6 Электрический ток, направление, сила тока, единицы измерения.
- 7 Законы Ома в  $R$  - цепях (для участка с  $R$ , полной цепи и неразветвленной цепи с несколькими источниками).
- 8 Режимы работы источников (Х.Х., К.З., согласованный режим).
- 9 Последовательное соединение резисторов. Основные соотношения для токов, напряжений и сопротивлений.
- 10 Параллельное соединение резисторов. Основные соотношения для токов, напряжений и сопротивлений.
- 11 I и II законы Кирхгофа.
- 12 Расчет цепей со смешанным соединением резисторов.
- 13 Расчет сложных цепей методом уравнений Кирхгофа.
- 14 Расчет сложных цепей методом наложения.
- 15 Расчет сложных цепей методом контурных токов.
- 16 Магнитное поле, напряженность, магнитная индукция, магнитная проницаемость, магнитный поток.
- 17 Явление электромагнитной индукции. Основной закон ЭМИ. Правило Ленца.
- 18 Самоиндукция, величина ЭДС самоиндукции, направление. Индуктивность.
- 19 Взаимоиндукция, величина и направление ЭДС ВИ. Взаимная индуктивность 2-х катушек.
- 20 Переменный ток, основные характеристики. (мгновенное, максимальное, действующее значения; период, круговая частота; частота; фаза; начальная фаза). Уравнения синусоидальных напряжений и токов.
- 21 Графическое изображение синусоидальных напряжений и токов. Сдвиг фаз между электрическими величинами.
- 22 Цепь с резистором. Временная и векторная диаграммы. Законы Ома. Мощность. Запись сопротивления резистора комплексным числом.
- 23 Цепь с индуктивностью. Временная и векторная диаграммы. Законы Ома. Индуктивное сопротивление и его зависимость от частоты. Мощность. Запись индуктивного сопротивления комплексным числом.

24 Цепь с конденсатором. Временная и векторная диаграммы. Законы Ома. Емкостное сопротивление, зависимость его от частоты. Мощность. Запись емкостного сопротивления комплексным числом.

25 Неразветвленная RL - цепь. Векторная диаграмма. Законы Ома. Полное сопротивление цепи. Формулы.

26 Неразветвленная RC - цепь. Векторная диаграмма. Законы Ома. Полное сопротивление цепи. Формулы.

27 Формулы  $X_L$  и  $X_C$ , графики  $X_L$  и  $X_C$  от частоты, запись  $X_L$  и  $X_C$  комплексным числом. Формулы резистивной и реактивных мощностей.

28 Входные АЧХ и ФЧХ RL-цепи. Формулы  $Z_{ВХ}$ ,  $Z_{ВХ}$ ,  $\varphi_{ВХ}$ . Графики  $Z_{ВХ}=f(f)$ ,  $\varphi_{ВХ}=f(f)$ .

29 Входные АЧХ и ФЧХ RC-цепи. Формулы  $Z_{ВХ}$ ,  $Z_{ВХ}$ ,  $\varphi_{ВХ}$ . Графики  $Z_{ВХ}=f(f)$ ,  $\varphi_{ВХ}=f(f)$ .

30 Неразветвленная RLC - цепь. Векторные диаграммы для 3-х случаев ( $X_L > X_C$ ;  $X_L < X_C$ ;  $X_L = X_C$ ). Законы Ома. Полное сопротивление цепи. Треугольники напряжений, сопротивлений, мощностей. Формулы.

31 Резонанс напряжений в неразветвленной RLC - цепи. Условие, признаки резонанса. Резонансные кривые.

32 Параллельное соединение RL и RC. Векторные диаграммы для трех случаев ( $V_L > V_C$ ,  $V_L < V_C$ ,  $V_L = V_C$ ). Схемы замещения.

33 Резонанс токов в цепи с параллельным соединением RL и RC. Условия, признаки резонанса.

34 Последовательный контур. Резонанс напряжений, условие, признаки, способы настройки в резонанс.

35 Входные АЧХ и ФЧХ последовательного контура. Графики  $Z_{ВХ}=f(f)$ ,  $\varphi_{ВХ}=f(f)$ .

36 Передаточная характеристика последовательного контура. Полоса пропускания. График  $H=f(f)$ . Влияние добротности на передаточную АЧХ.

37 Параллельный контур. Резонанс токов, условие, признаки, способы настройки в резонанс.

38 Входные АЧХ и ФЧХ параллельного контура. Графики  $Z_{ВХ}=f(f)$ ,  $\varphi_{ВХ}=f(f)$ .

39 Передаточная АЧХ параллельного контура. Влияние  $R_i$  на передаточную АЧХ контура.

40 Символический метод расчета RLC - цепей на гармоническом воздействии. Выражение напряжения, тока, сопротивлений и мощности комплексными числами. Законы Ома и Кирхгофа в символической форме.

41 Получение несинусоидальных напряжений и токов. Разложение несинусоидальных напряжений и токов в ряд Фурье (2 формы).

42 Виды симметрий. Разложение в ряд Фурье симметричных несинусоидальных напряжений и токов.

43 Расчет RLC-цепи при негармоническом воздействии.

44 Понятия о переходных процессах. Законы коммутации.

45 Переходные процессы в RL-цепи. Переходные процессы в RC-цепи.

Промежуточная аттестация по учебной дисциплине «Теории электрических цепей» предусмотрена в форме экзамена.

**Форма экзамена:** письменная

**Условия выполнения задания:**

Место выполнения задания: аудитория.

Максимальное время выполнения задания: 1 час 30 мин.

**Критерии оценивания заданий экзамена:**

«5» – 90% – 100% правильных ответов

«4» – 89% – 75% правильных ответов

«3» – 74% -60% правильных ответов

«2» – менее 60% правильных ответов

## Перечень рекомендуемых учебных изданий, Интернет-ресурсов, дополнительной литературы

### Основные источники:

1. Батура М.П. Теория электрических цепей [Электронный ресурс]: учебник/ М.П. Батура, А.П. Кузнецов, А.П. Курулев— Электрон. текстовые данные.— Минск: Вышэйшая школа, 2015.— 607 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/52136.html>.— ЭБС «IPRbooks»

2. Миненко, И.А. Электротехника: сборник описаний практических работ / сост. И.А. Миненко. - Архангельск : , 2014. \\ms\Books\_Irbis\minenko\sborn-lab-IV.pdf

3. Попова, О.М. Электротехника : сборник описаний практических работ / сост. О.М. Попова. - Архангельск : , 2015. \\ms\Books\_Irbis\minenko\sborn-prakt-IV.pdf

4. Соболев В. Н. Теория электрических цепей. [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов / В.Н. Соболев – М. :Горячая линия- Телеком,2014.- Режим доступа: <http://ibooks.ru/reading.php?productid=342063>

### Дополнительные источники:

1. Вострецова Е.В. Теория электрических цепей [Электронный ресурс]: лабораторный практикум/ Е.В. Вострецова, С.М. Зраенко, Ю.В. Шилов— Электрон. текстовые данные.— Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2015.— 136 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66208.html>.— ЭБС «IPRbooks»

2. Теория электрических цепей, схемотехника телекоммуникационных устройств, радиоприемные устройства систем мобильной связи, радиоприемные устройства систем радиосвязи и радиодоступа: Лабораторный практикум-III Учебное пособие / Фриск В.В., Ловгинов В.В. - М.:СОЛОН-Пр., 2016. - 480 с.: ил <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=884455>

---