

Министерство образования Республики Беларусь
Филиал БНТУ
«Минский государственный политехнический колледж»

**ЭЛЕКТРОННОЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

«Теоретические основы электротехники»

для учащихся специальностей:

2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования
(по направлениям)»

2-36 04 32 «Электроника механических транспортных средств»

2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

2-41 01 31 «Микроэлектроника»

2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

Авторы:

Гутько Е.С., Шмакова Т.С., Рогачёва А.А., Цепелев Д.В.

Рецензенты:

Голованова Н.В., преподаватель спецдисциплин филиала БНТУ «МГПК»

Белая О.Н., канд. физмат. наук,
доцент кафедры физики и методики преподавания физики

Электронное учебно-методическое пособие предназначено для самостоятельного и дистанционного изучения учебной дисциплины «Теоретические основы электротехники» учащимися специальностей 2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования (по направлениям)», 2-36 04 32 «Электроника механических транспортных средств», 2-37 01 05 «Городской электрический транспорт», 2-41 01 31 «Микроэлектроника», 2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы». В учебно-методическом пособии представлен теоретический материал, а также материал, обеспечивающий контроль знаний для проведения текущей и итоговой аттестации.

Белорусский национальный технический университет.

Филиал БНТУ “Минский государственный политехнический колледж”.

пр - т Независимости, 85, г. Минск, Республика Беларусь

Тел.: (017) 292-13-42 Факс: 292-13-42

E-mail: mgpk@bntu.by, mgpkby@mail.ru

<http://www.mgpk.bntu.by>

Регистрационный № ЭИ БНТУ/МГПК – 28.2019

© БНТУ, 2019

©Гутько Е.С., Шмакова Т.С.,

Рогачёва А.А., Цепелев Д.В 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Пояснительная записка

Вспомогательный раздел

Выписка из учебного плана

Междисциплинарные связи

Типовая учебная программа

Примерный тематический план

Тематический план

Десятибалльная шкала и показатели оценки результатов учебной деятельности обучающихся в учреждениях, обеспечивающих получение среднего специального образования

Литература

Перечень существенных и несущественных ошибок

Перечень средств обучения

Теоретический раздел

Введение. Электрическая энергия и её применение

Тема 1 Физические процессы в электрических цепях

1.1 Электрическое поле. Характеристики электрического поля

1.2 Электрический ток, электропроводность. Проводники, полупроводники и диэлектрики

1.3 Электрическая цепь. Ток в электрической цепи. Плотность тока

1.4 ЭДС и напряжение в электрической цепи. Электродвижущая сила.

Энергия и мощность электрического тока. Баланс мощностей

1.5 Закон Ома. Электрическое сопротивление. Закон Джоуля-Ленца

1.6 Электрическая цепь и ее элементы. Режимы работы элементов и электрических цепей

Тема 2 Расчет линейных электрических цепей постоянного тока

2.1 Режимы работы источников. Потенциальная диаграмма.

2.2 Ветвь, узел, контур электрической цепи. Законы Кирхгофа.

2.3 Неразветвленные и разветвленные электрические цепи. Особенности последовательного и параллельного соединения потребителей.

2.4 Методы расчета электрических цепей. Метод эквивалентных преобразований электрической цепи

2.5 Звезда и треугольник сопротивлений

2.6 Метод наложения токов

2.7 Метод узловых напряжений

2.8 Метод узловых и контурных уравнений

2.9 Метод контурных токов

2.10 Активный и пассивный двухполюсники. Метод эквивалентного генератора

Тема 3 Нелинейные электрические цепи постоянного тока

3.1 Общая характеристика нелинейных элементов электрической цепи постоянного тока

3.2 Нелинейные электрические цепи

Тема 4 Электростатическое поле в пустоте

4.1 Закон Кулона

4.2 Теорема Гаусса

Тема 5 Электростатическое поле в диэлектрике. Электростатические цепи

5.1 Диэлектрик. Электрический момент диполя. Поляризация диэлектрика

5.2 Электрическая емкость. Конденсаторы

5.3 Параллельное и последовательное соединение конденсаторов

5.4 Емкость и энергия конденсаторов

Тема 6 Магнитное поле в неферромагнитной среде

6.1 Основные понятия магнитного поля. Электромагнитная сила

6.2 Закон Био-Савара и его применения для расчёта магнитного поля в простейших случаях (ток в кольцевом и прямоугольном проводках)

Тема 7 Магнитное поле в ферромагнитной среде. Магнитные цепи. Электромагнитная индукция

7.1 Намагничивание ферромагнитных материалов. Магнитный гистерезис

7.2 Явление и ЭДС электромагнитной индукция, ЭДС самоиндукции, ЭДС взаимоиנדукции

Тема 8 Основные сведения о синусоидальном электрическом токе

8.1 Основные понятия

8.2 Величины, характеризующие синусоидальную ЭДС

8.3 Векторная диаграмма

8.4 Среднее и действующее значения переменного тока

Тема 9 Электрические цепи синусоидального тока. Элементы и параметры цепей синусоидального тока. Резонанс в электрических цепях.

9.1 Цепь с активным сопротивлением. Активная мощность

9.2 Цепь с идеальной индуктивностью. Реактивная мощность в цепи с индуктивностью

9.3 Цепь с идеальной ёмкостью. Реактивная мощность в цепи с конденсатором

9.4 Цепь с активным сопротивлением и индуктивностью

9.5 Цепь с активным сопротивлением и емкостью

9.6 Неразветвленная цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью

9.7 Схема замещения конденсатора с параллельным соединением элементов. Векторная диаграмма токов в цепи с конденсатором

9.8 Схема замещения реальной катушки с параллельным соединением элементов

9.9 Резонанс напряжений

9.10 Резонанс токов

Тема 10 Расчет электрических цепей переменного тока с помощью векторных диаграмм. Символический метод расчета электрических цепей переменного тока

10.1 Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью

10.2 Проводимость, расчет электрических цепей методом проводимостей

10.3 Взаимная индуктивность. Согласное, встречное включения катушек

10.4 Коэффициент мощности

10.5 Ток, напряжение, сопротивление и мощность в комплексном виде

10.6 Законы Кирхгофа в комплексной форме

Тема 11 Трехфазные цепи

11.1 Основные понятия

11.2 Соединение обмоток генератора звездой

11.3 Расчет симметричной трехфазной цепи

11.4 Расчет несимметричной трехфазной цепи

11.5 Расчёт несимметричной звезды графоаналитическим методом

11.6 Расчёт несимметричной звезды символическим методом

11.7 Роль нулевого провода

11.8 Соединение обмоток генератора и потребителей энергии «треугольником»

11.9 Мощность трёхфазного тока

11.10 Расчёт несимметричного треугольника

Тема 12 Электрические цепи с несинусоидальными периодическими напряжениями и токами

12.1 Основные понятия

12.2 Несинусоидальный ток в линейных электрических цепях

12.3 Действующее значение несинусоидальной величины. Мощность несинусоидального тока

Тема 13 Нелинейные электрические цепи переменного тока

13.1 Нелинейные элементы

13.2 Выпрямители – источники несинусоидального тока

13.3 Катушка с ферромагнитным сердечником

13.4 Мощность потерь. Векторная диаграмма катушки со стальным сердечником

13.5 Схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником

Тема 14 Переходные процессы в электрических цепях

14.1 Основные понятия

14.2 Подключение катушки индуктивности к источнику с постоянным напряжением

14.3 Отключение и замыкание RL-цепи

Раздел контроля знаний

Перечень вопросов к тематическому контролю №1

Перечень вопросов к тематическому контролю №2

Перечень вопросов к тематическому контролю №3

Перечень вопросов к тематическому контролю №4

Перечень вопросов к тематическому контролю №5

Перечень вопросов к обязательной контрольной работе №1

Перечень вопросов к обязательной контрольной работе №2

Перечень вопросов к экзамену

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Электронное учебно-методическое пособие (ЭУМП) может использоваться преподавателями, учащимися дневной и заочной формы получения образования для самостоятельного и дистанционного изучения материала учебной дисциплины «Теоретические основы электротехники».

ЭУМП состоит из вспомогательного, теоретического разделов и раздела контроля знания и содержит оглавление с возможностью перехода к избранному разделу.

Типовой учебной программой учебной дисциплины "Теоретические основы электротехники" предусматривается изучение физических законов, линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей постоянного и переменного тока, методов расчета и их практического использования.

Данная учебная дисциплина состоит из следующих разделов: линейные и нелинейные электрические цепи постоянного тока, электрическое и магнитное поле и линейные и нелинейные электрические цепи переменного тока.

Изучение учебной дисциплины является теоретической базой для изучения последующих дисциплин специального цикла, ее изучение базируется на учебном материале ряда общеобразовательных и естественно-математических дисциплин и, прежде всего, математики, физики.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Выписка из учебного плана
по специальности 2-41 01 31 «Микроэлектроника»

Учебная дисциплина «ТОЭ» изучается на протяжении 2 семестров
(дневная форма обучения).

Виды работ	Количество часов	
	3 семестр обучения	4 семестр обу- чения
Всего часов	50	60
Из них: практических занятий	–	–
лабораторных работ	14	16
курсовое проектирование	–	–
Количество: тематических контрольных работ	1	3
обязательных контрольных работ	1	1
*домашних контрольных работ		
Экзамен	–	1

*Для заочной формы обучения

Выписка из учебного плана
по специальности
2-36 04 32 «Электроника механических транспортных средств»

Учебная дисциплина «ТОЭ» изучается на протяжении 2 семестров
(дневная форма обучения).

Виды работ	Количество часов	
	3 семестр обучения	4 семестр обучения
Всего часов	72	88
Из них: практических занятий	–	–
лабораторных работ	16	14
курсовое проектирование	–	20
Количество: тематических контрольных работ	1	2
обязательных контрольных работ	1	1
*домашних контрольных работ		
Экзамен	–	1

*Для заочной формы обучения

Выписка из учебного плана
по специальности 2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

Учебная дисциплина «ТОЭ» изучается на протяжении 2 семестров
(дневная форма обучения).

Виды работ	Количество часов	
	3 семестр обучения	4 семестр обучения
Всего часов	84	108
Из них: практических занятий	–	–
лабораторных работ	16	24
курсовое проектирование	–	20
Количество: тематических контрольных работ	2	2
обязательных контрольных работ	1	1
*домашних контрольных работ		
Экзамен	–	1

*Для заочной формы обучения

Выписка из учебного плана
по специальности 2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования»

Учебная дисциплина «ТОЭ» изучается на протяжении 2 семестров
(дневная форма обучения).

Виды работ	Количество часов	
	3 семестр обучения	4 семестр обучения
Всего часов	80	112
Из них: практических занятий	–	–
лабораторных работ	16	24
курсовое проектирование	–	20
Количество: тематических контрольных работ	2	2
обязательных контрольных работ	1	1
*домашних контрольных работ	1	1
Экзамен	1	1

*Для заочной формы обучения

Выписка из учебного плана
по специальности 2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

Учебная дисциплина «ТОЭ» изучается на протяжении 2 семестров
(дневная форма обучения)

Виды работ	Количество часов	
	3 семестр обучения	4 семестр обучения
Всего часов	98	94
Из них: практических занятий	–	–
лабораторных работ	18	22
курсовое проектирование	–	20
Количество: тематических контрольных работ	2	2
обязательных контрольных работ	1	1
*домашних контрольных работ	1	1
Экзамен	1	1

*Для заочной формы обучения

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ СВЯЗИ

1. Электрические измерения
2. Физика
3. Математика
4. Основы промышленной электроники
5. Материаловедение
6. Электробезопасность
7. Электроснабжение
8. Электрические машины
9. Электрические аппараты

ТИПОВАЯ УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

для учреждений, обеспечивающих получение среднего
специального образования по специальностям

2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования (по направлениям)»

2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

2-41 01 31 «Микроэлектроника»

2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
Введение		
<p>Познакомить с электрической энергией, ее свойствами и применением. Дать представление по истории развития электрической энергии и перспективах ее развития в Республике Беларусь.</p> <p>Сформировать представление об учебной дисциплине.</p>	<p>Электрическая энергия, ее свойство и применение. Производство и распределение электрической энергии. Экономическая эффективность электрической энергии. Примеры экономии труда и средств за счет электрификации промышленности и сельского хозяйства.</p> <p>Краткий исторический обзор и перспективы дальнейшего развития электрификации Республики Беларусь. Значение электрификации для становления и развития различных отраслей экономики страны.</p> <p>Краткая характеристика учебной дисциплины, ее значение в подготовке специалиста, связь с другими дисциплинами учебного плана.</p>	<p>Высказывает общее суждение об электрической энергии, о свойствах и применении электрической энергии, истории развития электрической энергии и перспективах ее развития в Республике Беларусь.</p> <p>Высказывает общее суждение об учебной дисциплине.</p>
РАЗДЕЛ 1. ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА		
Тема 1.1. Физические процессы в электрических цепях		
<p>Дать понятие об электрическом поле, его основных характеристиках.</p> <p>Сформировать знания о стационарном электрическом поле в проводнике при постоянном электрическом токе.</p> <p>Сформировать знания об электрическом токе проводимости, электронной теории строения металлов.</p> <p>Дать понятие об удельной электрической проводимости,</p>	<p>Электрическое поле и его основные характеристики: напряженность, потенциал, напряженность. Электрическое поле как вид материи.</p> <p>Стационарное электрическое поле в проводнике при постоянном электрическом токе, сравнение его с электростатическим полем.</p> <p>Электрический ток проводимости (физические явления), его величина, направление и плотность. Электронная теория строения металлов.</p>	<p>Формулирует понятие “электрическое поле”, объясняет его основные характеристики.</p> <p>Описывает стационарное электрическое поле в проводнике при постоянном электрическом токе.</p> <p>Раскрывает понятие “электрический ток проводимости”, объясняет электронную теорию строения металлов.</p> <p>Трактует понятия “удельная</p>

<p>удельном электрическом сопротивлении, сформировать знания об их зависимости от материала, размеров, температуры проводников.</p> <p>Сформировать знания о явлении сверхпроводимости.</p> <p>Сформировать знания о законе Ома для участка цепи, резисторах и их вольтамперных характеристиках</p> <p>Сформировать знания об электрическом токе в вакууме. Дать понятие об электронной эмиссии, электрическом токе в полупроводниках, полупроводниковых приборах и их свойствах.</p> <p>Сформировать понятие об электрической цепи и ее основных элементах, электродвижущей силе.</p> <p>Сформировать знания о порядке расчета мощности и коэффициента полезного действия источника электрической энергии.</p> <p>Дать понятие о преобразовании электрической энергии в другие виды, против-ЭДС.</p> <p>Сформировать знания об элементах управления, контроля и защиты в электрических цепях.</p> <p>Дать понятие о законе Ома для замкнутой электрической цепи, балансе мощностей в электрической цепи.</p> <p>Сформировать знания о режимах работы электрической цепи и ее элементов.</p> <p>Сформировать знания о классификации схем электрических цепей.</p>	<p>Удельная электрическая проводимость и удельное электрическое сопротивление — характеристики проводниковых материалов. Электрическое сопротивление проводов. Зависимость сопротивления от материала, размеров, температуры проводников. Явление сверхпроводимости.</p> <p>Закон Ома для участка цепи. Резисторы и их вольтамперные характеристики.</p> <p>Электрический ток в вакууме. Понятие об электронной эмиссии. Электрический ток в полупроводниках. Полупроводниковые приборы и их свойства. Вольтамперная характеристика полупроводникового диода.</p> <p>Электрическая цепь и ее основные элементы. Получение электрической энергии из других видов энергии. Электродвижущая сила (ЭДС). Источники электрической энергии. Мощность и коэффициент полезного действия (КПД) источника электрической энергии.</p> <p>Преобразование электрической энергии в другие виды, понятие о против-ЭДС. Мощность и КПД приемника электрической энергии.</p> <p>Элементы управления, контроля и защиты в электрических цепях.</p> <p>Закон Ома для замкнутой электрической цепи. Баланс мощностей в электрической цепи.</p> <p>Режимы работы электрической цепи и ее элементов (номинальный, рабочий, холостого хода и короткого замыкания).</p> <p>Схемы электрических цепей: принципиальная, монтажная (схема соединений), расчетная (схема замещения). Схемы замещения источников ЭДС и то-</p>	<p>электрическая проводимость”, “удельное электрическое сопротивление” и устанавливает их зависимость от материала, размеров, температуры проводников.</p> <p>Характеризует явление сверхпроводимости.</p> <p>Трактует закон Ома для участка цепи, описывает резисторы и их вольт-амперные характеристики</p> <p>Объясняет возникновение электрического тока в вакууме. Раскрывает суть электронной эмиссии, электрического тока в полупроводниках, описывает полупроводниковые приборы и их свойства.</p> <p>Описывает электрическую цепь и ее основные элементы. Раскрывает суть электродвижущей силы.</p> <p>Излагает порядок расчета мощности и коэффициента полезного действия источника электрической энергии в расчетных задачах.</p> <p>Объясняет преобразование электрической энергии в другие виды, понятие против-ЭДС.</p> <p>Описывает элементы управления, контроля и защиты в электрических цепях.</p> <p>Объясняет закон Ома для замкнутой электрической цепи, баланс мощностей для электрической цепи.</p> <p>Характеризует режимы работы электрической цепи и ее элементов.</p> <p>Классифицирует схемы электрических цепей.</p>
---	---	---

	ка, приемников электрической энергии. Идеальные источники ЭДС и тока. Пассивные и активные элементы электрических цепей.	
<i>Лабораторная работа № 1</i>		
Сформировать умение подбирать аппаратуру, измерительные приборы для сборки схем, выполнению и оформлению лабораторных работ.	Изучение оборудования лаборатории, методов подбора аппаратуры и измерительных приборов для сборки схем.	Подбирает аппаратуру, измерительные приборы для сборки схем.
<i>Лабораторная работа № 2</i>		
Сформировать умение проводить исследование режимов электрической цепи и ее элементов.	Исследование режимов электрической цепи и ее элементов (неразветвленной электрической цепи с переменным сопротивлением приемника энергии).	Проводит исследование режимов электрической цепи и ее элементов.
Тема 1.2. Расчет линейных электрических цепей постоянного тока		
<p>Дать понятие об элементах схем электрических цепей.</p> <p>Сформулировать знания о первом и втором законах Кирхгофа для разветвленной цепи, об узловых и контурных уравнениях.</p> <p>Дать понятие о неразветвленной электрической цепи, последовательном соединении пассивных элементов и источников ЭДС; потере напряжения в проводах, порядке расчета эквивалентного сопротивления неразветвленной электрической цепи, потенциальных диаграмм для неразветвленных цепей.</p> <p>Сформировать знания о разветвленной электрической цепи с двумя узлами, порядке расчета проводимости ветвей, подключенных к одной паре узлов, эквивалентной проводимости группы ветвей.</p> <p>Дать понятие о порядке расчета электрических цепей путем преобразования их схем.</p>	<p>Задачи расчета электрических цепей. Элементы схем электрических цепей: ветвь, узел, контур.</p> <p>Первый закон Кирхгофа для разветвленной цепи, узловое уравнение. Второй закон Кирхгофа, контурные уравнения.</p> <p>Неразветвленная электрическая цепь. Последовательное соединение пассивных элементов, эквивалентное сопротивление неразветвленной электрической цепи (участка цепи). Потеря напряжения в проводах. Делитель напряжения. Последовательное соединение источников ЭДС. Потенциальная диаграмма неразветвленной цепи.</p> <p>Разветвленная электрическая цепь с двумя узлами. Параллельное соединение пассивных элементов, проводимость ветвей, подключенных к одной паре узлов, эквивалентная проводимость группы ветвей. Сочетание последовательного и параллельного соединений пассивных элементов.</p> <p>Расчет электрических цепей путем преобразования их схем.</p>	<p>Описывает элементы схем электрических цепей.</p> <p>Формулирует первый и второй законы Кирхгофа для разветвленной цепи. Излагает порядок составления узловых и контурных уравнений.</p> <p>Раскрывает суть неразветвленной электрической цепи, объясняет последовательное соединение пассивных элементов и источников ЭДС; причины потери напряжения в проводах. Излагает порядок расчета эквивалентного сопротивления неразветвленной электрической цепи и построения потенциальных диаграмм для неразветвленных цепей.</p> <p>Излагает понятие разветвленной электрической цепи с двумя узлами. Объясняет порядок расчета проводимости ветвей, подключенных к одной паре узлов, эквивалентной проводимости группы ветвей.</p> <p>Объясняет расчет электрических цепей путем преобразования их схем.</p>

<p>Сформировать знания о параллельном соединении источников ЭДС, порядке расчета электрических цепей с двумя узлами по методу узлового напряжения; распределение нагрузки между источниками электрической энергии при их параллельной работе на общий приемник энергии.</p> <p>Дать понятие о методе наложения токов и его применении для расчета электрических цепей.</p> <p>Дать понятие о расчете электрических цепей произвольной конфигурации методом узловых и контурных уравнений</p> <p>Сформировать знания об эквивалентном генераторе. Дать понятия об активном и пассивном двухполюсниках; определении ЭДС и внутреннего сопротивления эквивалентного генератора по опытам холостого хода и короткого замыкания.</p> <p>Дать понятие о сущности метода контурных токов, его сущность.</p> <p>Дать понятие о сущности метода узловых потенциалов.</p>	<p>"Свертывание" схем с последовательным и параллельным соединениями пассивных элементов. Понятие о треугольнике и звезде из пассивных элементов (сопротивлений), преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду и звезды в эквивалентный треугольник.</p> <p>Параллельное соединение источников ЭДС. Расчет электрических цепей с двумя узлами по методу узлового напряжения. Распределение нагрузки между источниками электрической энергии при их параллельной работе на общий приемник энергии.</p> <p>Принцип наложения токов в линейных электрических цепях, его применение для расчета электрических цепей.</p> <p>Расчет электрических цепей произвольной конфигурации методом узловых и контурных уравнений</p> <p>Эквивалентный генератор. Активный и пассивный двухполюсники. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления эквивалентного генератора по опытам холостого хода и короткого замыкания. Анализ режима ветви электрической цепи при изменении сопротивления этой ветви.</p> <p>Метод контурных токов, его сущность, собственное сопротивление контура, общее сопротивление контуров. Составление контурных уравнений.</p> <p>Метод узловых потенциалов, его сущность, собственная узловая проводимость, общая узловая проводимость. Составление узловых уравнений.</p>	<p>Объясняет параллельное соединение источников ЭДС, порядок расчета электрических цепей с двумя узлами по методу узлового напряжения; распределение нагрузки между источниками электрической энергии при их параллельной работе на общий приемник энергии.</p> <p>Описывает метод наложения токов при расчете электрических цепей.</p> <p>Объясняет порядок расчета электрических цепей произвольной конфигурации методом узловых и контурных уравнений</p> <p>Описывает эквивалентный генератор, активный и пассивный двухполюсники; способы определения ЭДС и внутреннего сопротивления эквивалентного генератора по опытам холостого хода и короткого замыкания.</p> <p>Раскрывает сущность метода контурных токов.</p> <p>Раскрывает сущность метода узловых потенциалов.</p>
<p><i>Лабораторная работа № 3</i></p>		
<p>Сформировать умение проводить исследование электрических цепей при последовательном и параллельном соединении сопротивлений.</p>	<p>Исследование электрических цепей при последовательном и параллельном соединении сопротивлений</p>	<p>Проводит исследование электрических цепей при последовательном и параллельном соединении сопротивлений.</p>

<i>Лабораторная работа № 4</i>		
Сформировать умение проводить исследование обобщенной цепи “источник-четыреполюсник-приемник”.	Сформировать умение проводить исследование обобщенной цепи “источник-четыреполюсник-приемник”.	Сформировать умение проводить исследование обобщенной цепи “источник-четыреполюсник-приемник”.
<i>Лабораторная работа № 5</i>		
Научить применять законы Кирхгофа к многоконтурной цепи.	Научить применять законы Кирхгофа к многоконтурной цепи.	Научить применять законы Кирхгофа к многоконтурной цепи.
<i>Лабораторная работа № 6</i>		
Сформировать умение измерять потенциалы точек в неразветвленной электрической цепи.	Сформировать умение измерять потенциалы точек в неразветвленной электрической цепи.	Сформировать умение измерять потенциалы точек в неразветвленной электрической цепи.
Тема 1.3. Нелинейные электрические цепи постоянного тока		
Сформировать знания о нелинейных элементах электрических цепей постоянного тока, их вольт-амперных характеристиках. Дать понятия о статическом и динамическом сопротивлениях нелинейного элемента, приведении нелинейных цепей к линейным, графическом расчете нелинейных электрических цепей постоянного тока при последовательном, параллельном и смешанном соединении элементов.	Сформировать знания о нелинейных элементах электрических цепей постоянного тока, их вольт-амперных характеристиках. Дать понятия о статическом и динамическом сопротивлениях нелинейного элемента, приведении нелинейных цепей к линейным, графическом расчете нелинейных электрических цепей постоянного тока при последовательном, параллельном и смешанном соединении элементов.	Сформировать знания о нелинейных элементах электрических цепей постоянного тока, их вольт-амперных характеристиках. Дать понятия о статическом и динамическом сопротивлениях нелинейного элемента, приведении нелинейных цепей к линейным, графическом расчете нелинейных электрических цепей постоянного тока при последовательном, параллельном и смешанном соединении элементов.
<i>Лабораторная работа № 7</i>		
Сформировать умение по снятию вольт-амперных характеристик нелинейных элементов, строить суммарную вольт-амперную характеристику.	Сформировать умение по снятию вольт-амперных характеристик нелинейных элементов, строить суммарную вольт-амперную характеристику.	Сформировать умение по снятию вольт-амперных характеристик нелинейных элементов, строить суммарную вольт-амперную характеристику.
РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ		
Тема 2.1. Электростатическое поле в пустоте		
Сформировать знания о законе Кулона, его применении для расчета электростатического поля точечных заряженных тел. Дать понятие о симметричных электростатических полях, созданных зарядами, распределенными на плоской и сферической поверхностях, о поле зарядов на поверхности длинного провода, о теореме Гаусса, порядке расчета напряженности в симметричных электростатических полях.	Закон Кулона. Применение закона Кулона для расчета электростатического поля точечных заряженных тел. Симметричные электростатические поля, созданные зарядами, распределенными на плоской и сферической поверхностях. Поле зарядов на поверхности длинного провода. Теорема Гаусса. Вычисление напряженности в симметричных электростатических полях.	Формулирует и применяет закон Кулона для расчета электростатического поля точечных заряженных тел. Характеризует симметричные электростатические поля, созданные зарядами, распределенными на плоской и сферической поверхностях, поле зарядов на поверхности длинного провода. Формулирует теорему Гаусса. Излагает порядок расчета напряженности в симметричных электростатических полях

Тема 2.2. Электростатическое поле в диэлектрике		
<p>Дать понятие о физическом строении диэлектрика, электрическом моменте диполя, поляризация диэлектрика, поляризованность.</p> <p>Сформировать понятие об электрическом смещении, диэлектрической проницаемости.</p> <p>Дать понятие об электрической емкости, порядке расчета емкости плоского и цилиндрического конденсаторов, двухпроводной линии.</p> <p>Дать понятие об электрическом пробое и электрической прочности диэлектрика, изменении электрического поля на границе двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями, энергии электрического поля, объемной плотности энергии электрического поля.</p>	<p>Физическое строение диэлектрика, электрический момент диполя. Поляризация диэлектрика, поляризованность (степень поляризации).</p> <p>Электрическое смещение. Диэлектрическая проницаемость (абсолютная и относительная).</p> <p>Электрическая емкость. Расчет емкости плоского и цилиндрического конденсаторов, двухпроводной линии.</p> <p>Электрический пробой и электрическая прочность диэлектрика. Изменение электрического поля на границе двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями. Энергия электрического поля. Объемная плотность энергии электрического поля.</p>	<p>Описывает физическое строение диэлектрика, электрический момент диполя, поляризацию диэлектрика, поляризованность.</p> <p>Объясняет электрическое смещение, диэлектрическую проницаемость.</p> <p>Определяет сущность электрической емкости. Рассчитывает емкости плоского и цилиндрического конденсаторов, двухпроводной линии.</p> <p>Описывает сущность электрического пробоя и электрической прочности диэлектрика, изменения электрического поля на границе двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями, энергия электрического поля, объемной плотности энергии электрического поля.</p>
Тема 2.3. Электростатические цепи		
<p>Сформировать знания об электрической емкости в системе заряженных тел, о способах соединения конденсаторов с идеальным диэлектриком, порядке расчета электростатических цепей при сочетании последовательного и параллельного соединений.</p>	<p>Электрическая емкость в системе заряженных тел. Соединение конденсаторов с идеальным диэлектриком: последовательное, параллельное. Расчет электростатических цепей при сочетании последовательного и параллельного соединений.</p>	<p>Характеризует электрическую емкость в системе заряженных тел. Объясняет способы соединения конденсаторов с идеальным диэлектриком, порядок расчета электростатических цепей при сочетании последовательного и параллельного соединений.</p>
<i>Лабораторная работа № 8</i>		
<p>Сформировать умение проводить исследование электростатических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединении конденсаторов.</p>	<p>Исследование электростатических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединении конденсаторов.</p>	<p>Проводит исследование электростатических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединении конденсаторов.</p>
Тема 2.4. Магнитное поле в неферромагнитной среде		
<p>Дать понятие о магнитном поле и его основных характеристиках, законе Ампера, формуле Био-Савара и применении для расчета магнитного поля в простейших случаях.</p>	<p>Магнитное поле как вид материи. Закон Ампера, магнитная постоянная. Магнитная индукция - силовая характеристика магнитного поля. Формула</p>	<p>Раскрывает суть магнитного поля, объясняет его основные характеристики. законы Ампера и формулы Био-Савара.</p>

<p>Дать понятие намагничивающей силе вдоль контура, полном токе контура, порядке определения магнитной индукции в симметричных магнитных полях.</p> <p>Дать понятие о работе при перемещении контура с током в магнитном поле о магнитном токе, магнитном потокосцеплении, собственном магнитном потокосцеплении катушки.</p> <p>Дать понятие об индуктивности, о порядке определения индуктивности кольцевой и цилиндрической катушек, участка двухпроводной линии.</p> <p>Дать понятия “взаимное потокосцепление” и “взаимная индуктивность”, “магнитное рассеяние”, “коэффициент магнитной связи”, “энергия магнитного поля”, “объемная плотность энергии магнитного поля”.</p>	<p>Био-Савара и ее применение для расчета магнитного поля в простейших случаях (ток в кольцевом и прямолинейном проводах).</p> <p>Намагничивающая сила вдоль контура. Полный ток контура. Вычисление магнитной индукции в симметричных магнитных полях: поле тока прямого провода, цилиндрической катушки, кольцевой катушки.</p> <p>Работа при перемещении контура с током в магнитном поле. Магнитный ток, магнитное потокосцепление, собственное магнитное потокосцепление катушки.</p> <p>Индуктивность. Определение индуктивности кольцевой катушки, цилиндрической катушки, участка двухпроводной линии.</p> <p>Взаимное потокосцепление и взаимная индуктивность, магнитное рассеяние, понятие о коэффициенте магнитной связи. Энергия магнитного поля. Объемная плотность энергии магнитного поля.</p>	<p>Раскрывает суть намагничивающей силы вдоль контура, полного тока контура. Объясняет порядок определения магнитной индукции в симметричных магнитных полях.</p> <p>Объясняет работу при перемещении контура с током в магнитном поле. Объясняет суть магнитного тока, магнитного потокосцепления, собственного магнитного потокосцепления катушки.</p> <p>Раскрывает суть индуктивности. Объясняет порядок определения индуктивности кольцевой и цилиндрической катушке, участка двухпроводной линии.</p> <p>Формулирует понятия “взаимное потокосцепление”, “взаимная индуктивность”, “магнитное рассеяние”, “коэффициент магнитной связи”, “энергия магнитного поля”, “объемная плотность энергии магнитного поля”.</p>
Тема 2.5. Магнитное поле в ферромагнитной среде		
<p>Сформировать знания о магнитных свойствах вещества, намагничивании вещества, намагниченности, напряженности магнитного поля, магнитной проницаемости и законе полного тока.</p> <p>Сформировать знания о свойствах и применении ферромагнитных материалов, кривой первоначального намагничивания, циклическом перемагничивании ферромагнитных материалов, магнитном гистерезисе, об изменении магнитного поля на границе двух сред.</p>	<p>Магнитные свойства вещества. Намагничивание вещества, намагниченность (степень намагничивания). Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость (абсолютная и относительная). Закон полного тока.</p> <p>Свойства и применение ферромагнитных материалов. Кривая первоначального намагничивания. Циклическое перемагничивание ферромагнитных материалов, магнитный гистерезис. Изменение магнитного поля на границе двух сред.</p>	<p>Описывает магнитные свойства вещества, намагничивание вещества, намагниченность, напряженность магнитного поля, магнитная проницаемость. Формулирует закон полного тока.</p> <p>Излагает свойства и применении ферромагнитных материалов. Объясняет кривую первоначального намагничивания, циклическое перемагничивание ферромагнитных материалов, магнитный гистерезис, изменение магнитного поля на границе двух сред.</p>

Тема 2.6. Магнитные цепи		
<p>Сформировать знания о классификации магнитных цепей, законе полного тока в применении к магнитной цепи.</p> <p>Дать понятие о порядке расчета неразветвленной однородной и неоднородной магнитных цепей.</p> <p>Сформировать знание о законах Ома и Кирхгофа для магнитной цепи.</p> <p>Дать понятие о порядке расчета разветвленных магнитных цепей и магнитных цепей с постоянными магнитами.</p>	<p>Классификация магнитных цепей. Закон полного тока в применении к магнитной цепи.</p> <p>Расчет неразветвленной однородной магнитной цепи: решение прямой и обратной задач. Магнитное сопротивление.</p> <p>Закон Ома для магнитной цепи.</p> <p>Расчет неразветвленной неоднородной магнитной цепи: решение прямой задачи, метод последовательных приближений и графоаналитическое решение обратной задачи.</p> <p>Расчет разветвленных магнитных цепей и магнитных цепей с постоянными магнитами. Законы Кирхгофа для магнитной цепи, аналогии между законами магнитной и электрической цепей.</p>	<p>Излагает классификацию магнитных цепей. Объясняет закон полного тока в применении к магнитной цепи.</p> <p>Объясняет порядок расчета неразветвленной однородной и неоднородной магнитных цепей.</p> <p>Формулирует законы Ома и Кирхгофа для магнитной цепи.</p> <p>Описывает алгоритм расчета разветвленных магнитных цепей и магнитных цепей с постоянными магнитами.</p>
<i>Лабораторная работа № 9</i>		
<p>Сформировать умение проводить исследование магнитной цепи.</p>	<p>Исследование магнитной цепи.</p>	<p>Проводит исследование магнитной цепи.</p>
Тема 2.7. Электромагнитная индукция		
<p>Дать понятие явления электромагнитной индукции, законе электромагнитной индукции, правиле (законе) Ленца.</p> <p>Сформировать знание о порядке расчета ЭДС, индуцируемой в проводнике, движущемся в магнитном поле. Раскрыть сущность электромагнитной индукции. Дать понятие ЭДС самоиндукции и взаимоиנדукции, вихревых токах, их использовании и способах ограничения.</p> <p>Сформировать представление об использовании электромагнитной индукции. Сформировать знания о принципе действия трансформатора.</p>	<p>Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции. Правило (закон) Ленца.</p> <p>Выражение ЭДС, индуцируемой в проводнике, движущемся в магнитном поле. Правило правой руки. Сущность электромагнитной индукции. ЭДС самоиндукции и взаимоиנדукции. Вихревые токи, их использование и способы ограничения.</p> <p>Использование электромагнитной индукции: преобразование механической энергии в электрическую (принцип действия генератора), преобразование электрической энергии в механическую (принцип работы электродвигателя). Принцип действия трансформатора</p>	<p>Раскрывает суть явления электромагнитной индукции, закона электромагнитной индукции, правила (закон) Ленца.</p> <p>Излагает порядок расчета ЭДС, индуцируемой в проводнике, движущемся в магнитном поле. Определяет сущность электромагнитной индукции. Характеризует ЭДС самоиндукции и взаимоиנדукции, вихревые токи, их использование и способы ограничения.</p> <p>Высказывает общие суждения об использовании электромагнитной индукции. Объясняет принцип действия трансформатора.</p>

Обязательная контрольная работа № 1

РАЗДЕЛ 3. ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Тема 3.1. Основные сведения о синусоидальном электрическом токе

<p>Сформировать знания о получении синусоидальной ЭДС, схеме устройства генератора переменного тока, об уравнении и графиках синусоидальных величин.</p> <p>Сформировать знания о графических способах выражения синусоидальных величин в прямоугольной системе координат, при помощи вращающихся радиус-векторов. Дать понятие о принципе сложения и вычитания синусоидальных величин, векторной диаграмме.</p> <p>Сформировать знания о действующем и среднем значениях синусоидального тока, коэффициенте формы и амплитуды кривой.</p>	<p>Получение синусоидальной ЭДС. Схема устройства генератора переменного тока. Уравнения и графики синусоидальных величин: мгновенное и амплитудное значения, период, частота, фаза, начальная фаза, угловая частота.</p> <p>Графические способы выражения синусоидальных величин в прямоугольной системе координат, при помощи вращающихся радиус-векторов. Сложение и вычитание синусоидальных величин. Векторная диаграмма. Сдвиг фаз.</p> <p>Действующие и средние значения синусоидального тока. Коэффициент формы и амплитуды кривой</p>	<p>Объясняет получение синусоидальной ЭДС, схему устройства генератора переменного тока.</p> <p>Описывает графические способы выражения синусоидальных величин в прямоугольной системе координат, при помощи вращающихся радиус-векторов. Объясняет принцип сложения и вычитания синусоидальных величин, векторную диаграмму.</p> <p>Описывает действующее и среднее значения синусоидального тока, коэффициент формы и амплитуды кривой.</p>
--	--	---

Тема 3.2. Элементы электрических цепей переменного тока и их параметры

<p>Дать понятие об элементах цепей переменного тока.</p> <p>Сформировать знания о цепи переменного тока с активным сопротивлением.</p> <p>Сформировать знания о цепи переменного тока с индуктивностью</p> <p>Сформировать знания о цепи переменного тока с емкостью.</p>	<p>Элементы цепей переменного тока: резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы. Сопротивление, индуктивность и емкость - параметры электрических цепей переменного тока.</p> <p>Цепь переменного тока с активным сопротивлением: выражение тока и мощности при синусоидальном напряжении, векторная диаграмма цепи, понятие об активной мощности. Явление поверхностного эффекта.</p> <p>Цепь переменного тока с индуктивностью: выражение напряжения и мощности при синусоидальном токе, векторная диаграмма цепи, понятие об индуктивном сопротивлении и индуктивной (реактивной) мощности.</p> <p>Цепь переменного тока с емкостью: выражение тока и мощности при синусоидальном напряжении, векторная диа-</p>	<p>Определяет элементы цепей переменного тока.</p> <p>Описывает цепи переменного тока с активным сопротивлением.</p> <p>Описывает цепи переменного тока с индуктивностью.</p> <p>Описывает цепи переменного тока с емкостью.</p>
---	--	--

<p>Сформировать понятие о схемах замещения катушки индуктивности и конденсатора с потерями, порядок построения векторных диаграмм сопротивлений при последовательным соединением активного и реактивного элементов.</p> <p>Дать понятия о схемах замещения с параллельным соединением активного и реактивного элементов</p> <p>Дать понятие об активной, реактивной и полной мощностях катушки индуктивности и конденсатора с потерями, о треугольнике мощностей.</p>	<p>грамма цепи, понятие об емкостном сопротивлении и емкостной (реактивной) мощности.</p> <p>Схемы замещения катушки индуктивности и конденсатора с потерями. Схема с последовательным соединением активного и реактивного элементов: векторные диаграммы, активная и реактивная составляющие вектора напряжения, треугольник сопротивлений.</p> <p>Схема замещения с параллельным соединением активного и реактивного элементов: векторная диаграмма, активная и реактивная составляющие вектора тока, треугольник проводимостей.</p> <p>Активная, реактивная и полная мощности катушки индуктивности и конденсатора с потерями. Треугольник мощностей.</p>	<p>Описывает схемы замещения катушки индуктивности и конденсатора с потерями, порядок построения векторных диаграмм, схем с последовательным соединением активного и реактивного элементов.</p> <p>Описывает схемы замещения с параллельным соединением активного и реактивного элементов.</p> <p>Рассчитывает суть активной, реактивной и полной мощностей катушки индуктивности и конденсатора с потерями, объясняет порядок построения треугольника мощностей.</p>
<i>Лабораторная работа № 10</i>		
Сформировать умение проводить измерение параметров катушки индуктивности.	Измерение параметров катушки индуктивности	Проводит измерение параметров катушки индуктивности
<i>Лабораторная работа № 11</i>		
Сформировать умение исследовать цепь переменного тока с активным сопротивлением и емкостью.	Изучение цепи переменного тока с активным сопротивлением и емкостью.	Проводит исследование цепи переменного тока с активным сопротивлением и емкостью.
<i>Лабораторная работа № 12</i>		
Сформировать умение исследовать цепь переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью.	Изучение цепи переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью	Проводит исследование цепи переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью
<i>Лабораторная работа № 13</i>		
Сформировать умение исследовать цепь переменного тока при последовательном соединении катушки индуктивности и конденсатора.	Исследование цепи переменного тока при последовательном соединении катушки индуктивности и конденсатора.	Проводит исследование цепи переменного тока при последовательном соединении катушки индуктивности и конденсатора.
<i>Лабораторная работа № 14</i>		
Сформировать умение исследовать цепь	Исследование цепи переменного тока при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора.	Проводит исследование цепи переменного тока при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора.

Тема 3.3. Расчет электрических цепей переменного тока с помощью векторных диаграмм

<p>Дать понятие об алгоритме расчета неразветвленной цепи синусоидального тока с одним источником питания при последовательном соединении активного сопротивления, индуктивности и емкости при различных соотношениях величин реактивных сопротивлений; цепи с произвольным числом активных и реактивных элементов, построения топографической векторной диаграммы; цепи с двумя узлами и одним источником питания, построения векторных диаграмм цепи, треугольников сопротивления, проводимостей и мощностей.</p> <p>Сформировать знания о компенсации реактивной мощности в электрических сетях с помощью конденсаторов, влияния величины реактивной мощности на технико-экономические показатели электроустановки, коэффициента мощности электроустановки, способах сокращения реактивной мощности в электрических сетях, порядок расчета компенсационной установки с конденсаторами.</p>	<p>Расчет неразветвленной цепи синусоидального тока с одним источником питания при последовательном соединении активного сопротивления, индуктивности и емкости при различных соотношениях величин реактивных сопротивлений ($X_L > X_C$, $X_L < X_C$, $X_L = X_C$): векторная диаграмма цепи, треугольники сопротивлений и мощностей.</p> <p>Цепь с произвольным числом активных и реактивных элементов, построения топографической векторной диаграммы.</p> <p>Расчет разветвленной цепи с двумя узлами и одним источником питания: цепь с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора при различных соотношениях величин реактивных проводимостей ($B_L > B_C$, $B_L < B_C$, $B_L = B_C$). Графоаналитический метод расчета и метод проводимостей. Цепь с произвольным числом активных и реактивных элементов. Векторная диаграмма цепи. Треугольники проводимостей и мощностей.</p> <p>Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с помощью конденсаторов. Влияние величины реактивной мощности на технико-экономические показатели электроустановки. Коэффициент мощности электроустановки. Способы сокращения реактивной мощности в электрических сетях. Расчет компенсационной установки с конденсаторами.</p>	<p>Описывает алгоритм расчета неразветвленной цепи синусоидального тока с одним источником питания при последовательном соединении активного сопротивления, индуктивности и емкости при различных соотношениях величин реактивных сопротивлений, цепи с произвольным числом активных и реактивных элементов, разветвленной цепи с двумя узлами и одним источником питания.</p> <p>Раскрывает суть компенсации реактивной мощности в электрических сетях с помощью конденсаторов, влияния величины реактивной мощности на технико-экономические показатели электроустановки, коэффициента мощности электроустановки, объясняет способы сокращения реактивной мощности в электрических сетях, порядок расчета компенсационных установок с конденсаторами.</p>
---	--	---

Тема 3.4. Расчет электрических цепей синусоидального тока с применением комплексных чисел

<p>Сформировать знания о выражении синусоидальных напряжений и токов комплекс-</p>	<p>Выражение синусоидальных напряжений и токов комплексными числами. Комплекс-</p>	<p>Объясняет выражение синусоидальных напряжений и токов комплексными числами,</p>
--	--	--

<p>ными числами, комплексные сопротивления и проводимости, порядке определения мощности по известным комплексным напряжению и току.</p> <p>Сформировать знания о законах Ома и Кирхгофа в комплексной форме, символическом методе расчета цепей переменного тока, методах преобразования, узлового напряжения, узловых и контурных уравнений.</p>	<p>ные сопротивления и проводимость. Вычисление мощности по известным комплексным напряжению и току.</p> <p>Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме. Символический метод расчета цепей переменного тока, аналогия с цепями постоянного тока. Расчет электрических цепей синусоидального тока с применением комплексных чисел: методы преобразования, узлового напряжения, узловых и контурных уравнений.</p>	<p>раскрывает суть комплексных сопротивления и проводимость. Описывает порядок определения мощности по известным комплексным напряжению и току.</p> <p>Формирует законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме. Описывает символический метод расчета цепей переменного тока, методы преобразования, узлового напряжения, узловых и контурных уравнений.</p>
---	--	--

Тема 3.5. Трехфазные симметричные цепи

<p>Дать понятие об однофазной и многофазной системах электрических цепей, трехфазных системах электрических цепей, трехфазных симметричных системах ЭДС, соединении обмоток генератора звездой и треугольником, фазные и линейные напряжения, соотношение между ними. Дать представление о схеме устройства трехфазного электромагнитного генератора.</p> <p>Сформировать знания о симметричной нагрузке в трехфазной цепи при соединении приемника звездой и треугольником, фазные и линейные токи, соотношение между ними.</p> <p>Дать понятие о порядке расчета симметричные цепи при соединении приемника звездой и треугольником, мощность трехфазной цепи при симметричном режиме.</p> <p>Дать понятие о несимметричной нагрузке в трехфазной цепи, четырехпроводной трехфазной системе, роль нейтрального провода.</p> <p>Сформировать знания о вращающемся магнитном поле, трехфазной системе обмоток. Дать представление о получении вращающегося магнитного</p>	<p>Понятие об однофазной и многофазной системах электрических цепей. Трехфазные системы электрических цепей. Трехфазная симметричная система ЭДС. Схема устройства трехфазного электромагнитного генератора. Соединение обмоток генератора звездой и треугольником. Фазные и линейные напряжения, соотношение между ними.</p> <p>Симметричная нагрузка в трехфазной цепи при соединении приемника звездой и треугольником. Фазные и линейные токи, соотношение между ними.</p> <p>Расчет симметричной цепи при соединении приемника звездой и треугольником. Мощность трехфазной цепи при симметричном режиме.</p> <p>Понятие о несимметричной нагрузке в трехфазной цепи. Четырехпроводная трехфазная система, роль нейтрального провода.</p> <p>Вращающееся магнитное поле, трехфазная система обмоток. Получение вращающегося магнитного поля посредством трехфазной системы токов.</p>	<p>Раскрывает суть однофазной и многофазной систем электрических цепей, трехфазных систем электрических цепей, трехфазных симметричных систем ЭДС, объясняет соединение обмоток генератора звездой и треугольником, фазные и линейные напряжения, соотношение между ними. Описывает схему устройства трехфазного электромагнитного генератора.</p> <p>Раскрывает суть симметричной нагрузки в трехфазной цепи при соединении приемника звездой и треугольником, фазных и линейных токов, объясняет соотношение между ними.</p> <p>Объясняет порядок расчета симметричных цепей при соединении приемника звездой и треугольником, мощности трехфазной цепи при симметричном режиме.</p> <p>Раскрывает суть несимметричной нагрузки в трехфазной цепи, четырехпроводной трехфазной системы. Объясняет роль нейтрального привода.</p> <p>Раскрывает суть вращающегося магнитного поля, трехфазной системы обмоток. высказывает общее суждение о получении вращающегося маг-</p>
---	--	--

поля посредством трехфазной системы токов.		нитного поля посредством трехфазной системы токов.
<i>Лабораторная работа №15</i>		
Сформировать умение проводить измерение трехфазной цепи при соединении приемника звездой.	Исследование трехфазной цепи при соединении приемника звездой.	Проводит измерение трехфазной цепи при соединении приемника звездой.
<i>Лабораторная работа №16</i>		
Сформировать умение исследовать трёхфазной цепи при соединении приемника треугольником.	Исследование трёхфазной цепи при соединении приемника треугольником.	Проводит исследование трёхфазной цепи при соединении приемника треугольником.
Тема 3.6. Электрические цепи с несинусоидальными периодическими напряжениями и токами		
<p>Дать понятия о причинах возникновения несинусоидальных ЭДС, токов и напряжений в электрических цепях.</p> <p>Сформировать знания об аналитическом выражении несинусоидальных периодических величин в форме тригонометрического ряда, разложении несинусоидальной периодической величины в тригонометрический ряд, признаках симметрии несинусоидальных кривых и их влияние на вид тригонометрического ряда.</p> <p>Дать понятия о действующем значении несинусоидального периодического тока (напряжения), коэффициентах формы, амплитуды, искажения периодической кривой, мощности цепи при несинусоидальном токе.</p> <p>Дать понятие о порядке расчета линейных электрических цепей при несинусоидальном периодическом напряжении на ее входе.</p>	<p>Причины возникновения несинусоидальных ЭДС, токов и напряжений в электрических цепях: искажение ЭДС в электромагнитном генераторе, наличие в цепях нелинейных элементов.</p> <p>Аналитическое выражение несинусоидальных периодических величин в форме тригонометрического ряда. Понятие о разложении несинусоидальной периодической величины в тригонометрический ряд. Признаки симметрии несинусоидальных кривых и их влияние на вид тригонометрического ряда.</p> <p>Действующее значение несинусоидального периодического тока (напряжения). Понятие о коэффициентах формы, амплитуды, искажения периодической кривой. Мощность цепи при несинусоидальном токе.</p> <p>Расчет линейной электрической цепи при несинусоидальном периодическом напряжении на ее входе.</p>	<p>Определяет причины возникновения несинусоидальных ЭДС, токов и напряжений в электрических цепях.</p> <p>Объясняет аналитическое выражение несинусоидальных периодических величин в форме тригонометрического ряда, разложение несинусоидальной периодической величины в тригонометрический ряд, признаках симметрии несинусоидальных кривых и их влияние на вид тригонометрического ряда.</p> <p>Раскрывает суть действующего значения несинусоидального периодического тока (напряжения), коэффициентов формы, амплитуды, искажения периодической кривой, мощности цепи при несинусоидальном токе.</p> <p>Объясняет порядок расчета линейных электрических цепей при несинусоидальном периодическом напряжении на ее входе.</p>
Тема 3.7. Нелинейные электрические цепи переменного тока		
<p>Дать понятие об общей характеристике нелинейных элементов переменного тока.</p> <p>Сформировать знания о цепях с активными нелинейными сопротивлениями, нелинейной</p>	<p>Общая характеристика нелинейных элементов переменного тока.</p> <p>Цепи с активными нелинейными сопротивлениями. Цепи с нелинейной емкостью.</p>	<p>Объясняет общую характеристику нелинейных элементов переменного тока.</p> <p>Описывает цепи с активными нелинейными сопротивлениями, нелинейной емкостью,</p>

<p>емкостью, нелинейной индуктивностью, об идеализированной катушке с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока. Дать понятие о влиянии гистерезиса и вихревых токов на ток в катушке с ферромагнитным сердечником, потерях энергии в ферромагнитном сердечнике катушки, об алгоритме построения векторных диаграмм с их учетом.</p> <p>Дать понятие о полной векторной диаграмме и схеме замещения катушки с ферромагнитным сердечником.</p> <p>Сформировать знания о применении катушек с ферромагнитным сердечником, феррорезонансе и его использовании, ферромагнитных элементах с одновременным намагничиванием постоянным и переменным током, ферромагнитных элементах с прямоугольной петлей магнитного гистерезиса.</p>	<p>Цепи с нелинейной индуктивностью. Идеализированная катушка с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока: магнитный поток, ЭДС и ток катушки, векторная диаграмма. Влияние гистерезиса и вихревых токов на ток в катушке с ферромагнитным сердечником. Потери энергии в ферромагнитном сердечнике катушки, векторная диаграмма с их учетом.</p> <p>Полная векторная диаграмма и схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником.</p> <p>Примеры применения катушек с ферромагнитным сердечником. Понятие о феррорезонансе и его использование. Понятие о ферромагнитных элементах с одновременным намагничиванием постоянным и переменным током. Ферромагнитные элементы с прямоугольной петлей магнитного гистерезиса.</p>	<p>нелинейной индуктивностью, идеализированную катушку с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока. Раскрывает сущность влияния гистерезиса и вихревых токов на ток в катушке с ферромагнитным сердечником, потерь энергии в ферромагнитном сердечнике катушки, излагает порядок построения векторных диаграмм с их учетом.</p> <p>Описывает полную векторную диаграмму и схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником.</p> <p>Объясняет применение катушек с ферромагнитным сердечником. Раскрывает суть феррорезонансе и его использования, описывает ферромагнитные элементы с одновременным намагничиванием постоянным и переменным током, ферромагнитные элементы с прямоугольной петлей магнитного гистерезиса.</p>
<p><i>Лабораторная работа №17</i></p>		
<p>Сформировать умение исследовать мощность потерь энергии в ферромагнитном сердечнике катушки.</p>	<p>Измерение мощности потерь энергии в ферромагнитном сердечнике катушки.</p>	<p>Проводит исследование мощности потерь энергии в ферромагнитном сердечнике катушки.</p>
<p>Тема 3.8. Переходные процессы в электрических цепях</p>		
<p>Познакомить с переходными процессами в электрических цепях.</p> <p>Сформировать знания о зарядке конденсатора через сопротивление от источника постоянного напряжения, влиянии величины напряжения источника и параметров цепи на переходной процесс.</p>	<p>Общие сведения о переходных процессах в электрических цепях: причины возникновения переходных процессов, первый и второй законы коммутации, понятие о переходных принужденном и свободном режимах.</p> <p>Заряд конденсатора через сопротивление от источника постоянного напряжения: уравнения и графики зарядного тока и переходного напряжения на конденсаторе, постоянная времени цепи, принужденная и свободная составляющие переходного напряжения и зарядно-</p>	<p>Рассказывает общие суждение о переходных процессах в электрических цепях.</p> <p>Описывает зарядку конденсатора через сопротивление от источника постоянного напряжения. Объясняет влияние величины напряжения источника и параметров цепи на переходной процесс.</p>

<p>Дать понятие о разрядке конденсатора через сопротивление.</p> <p>Сформировать знания о включении катушки индуктивности (цепи R, L) на постоянное напряжение, влиянии величины напряжения источника и параметров цепи на переходной процесс.</p> <p>Сформировать знания об отключении катушки индуктивности от источника постоянного напряжения, о влиянии напряжения источника и параметров цепи на переходной процесс.</p> <p>Сформировать понятие об изменении сопротивления в цепи с индуктивностью.</p> <p>Дать понятие о включении катушки индуктивности на синусоидальное напряжение, влиянии начальной фазы приложенного напряжения и параметров цепи на переходной процесс.</p> <p>Сформировать знания о включении конденсатора на синусоидальное напряжение, влиянии начальной фазы тока и параметров цепи на переходной процесс.</p> <p>Дать понятие о коротком замыкании в цепи синусоидального тока, схеме замещения цепи короткого замыкания, влия-</p>	<p>го тока. Влияние величины напряжения источника и параметров цепи на переходной процесс.</p> <p>Разряд конденсатора через сопротивление. Уравнения и графики напряжения на конденсаторе и тока в цепи при разряде. Саморазряд конденсатора.</p> <p>Включение катушки индуктивности (цепи R, L) на постоянное напряжение. Уравнение и график переходного тока, постоянная времени цепи, принужденная и свободная составляющие переходного процесса. Влияние величины напряжения источника и параметров цепи на переходной процесс.</p> <p>Отключение катушки индуктивности от источника постоянного напряжения. Изменение тока в катушке, замкнутой на разрядное сопротивление, график и уравнение переходного тока. Влияние напряжения источника и параметров цепи на переходной процесс.</p> <p>Изменение сопротивления в цепи с индуктивностью: графики и уравнения тока в цепи при уменьшении и увеличении сопротивления скачком.</p> <p>Включение катушки индуктивности на синусоидальное напряжение, график и уравнение переходного тока на индуктивности. Влияние начальной фазы приложенного напряжения и параметров цепи на переходной процесс.</p> <p>Включение конденсатора на синусоидальное напряжение, график и уравнение переходного напряжения на емкости. Влияние начальной фазы тока и параметров цепи на переходной процесс.</p> <p>Короткое замыкание в цепи синусоидального тока. Схема замещения цепи короткого замыкания. Уравнение кривой пе-</p>	<p>Описывает разрядку конденсатора через сопротивление.</p> <p>Объясняет включение катушки индуктивности (цепи R, L) на постоянное напряжение, влияние величины напряжения источника и параметров цепи на переходной процесс.</p> <p>Объясняет отключение катушки индуктивности от источника постоянного напряжения, влияние напряжения источника и параметров цепи на переходной процесс.</p> <p>Объясняет изменение сопротивления в цепи с индуктивностью.</p> <p>Описывает включение катушки индуктивности на синусоидальное напряжение. Объясняет влияние начальной фазы приложенного напряжения и параметров цепи на переходной процесс. Описывает включение конденсатора на синусоидальное напряжение. Объясняет влияние начальной фазы тока и параметров цепи на переходной процесс.</p> <p>Раскрывает суть коротком замыкании в цепи синусоидального тока, описывает схему замещения цепи короткого замыкания, объясняет влияние начальной фазы напряжения на</p>
--	---	--

нии начальной фазы напряжения на переходной процесс короткого замыкания.	реходного тока, графики переходного процесса при коротком замыкании цепи. Влияние начальной фазы напряжения на переходной процесс короткого замыкания.	переходной процесс короткого замыкания.
<i>Лабораторная работа № 18</i>		
Сформировать умение исследовать переходные процессы зарядки и разрядки конденсаторов.	Исследование переходных процессов зарядки и разрядки конденсаторов.	Проводит исследование переходных процессов зарядки и разрядки конденсаторов.
Обязательная контрольная работа № 2		
РАЗДЕЛ 4. ТЕМЫ, ОТРАЖАЮЩИЕ СВЯЗЬ СО СПЕЦИАЛЬНОСТЬЮ (ПО ВЫБОРУ)		
Тема 4.1. Некоторые методы анализа сложных электрических цепей постоянного тока		
<p>Дать понятие о матричных методах расчета для сложных электрических цепей постоянного тока, об алгоритме расчета сложных электрических цепей постоянного тока на ЭВМ.</p> <p>Дать понятие о методах анализа нелинейных электрических цепей постоянного тока, об аналитическом методе расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока, аппроксимации характеристик нелинейных элементов.</p> <p>Дать понятие о методах эквивалентного генератора для расчета нелинейных цепей, последовательных приближений для расчета нелинейных электрических цепей.</p>	<p>Матричные методы расчета сложных электрических цепей постоянного тока: контурных токов, узловых потенциалов. Алгоритм расчета сложных электрических цепей постоянного тока на ЭВМ.</p> <p>Методы анализа нелинейных электрических цепей постоянного тока. Понятие об аналитическом методе расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока. Аппроксимация характеристик нелинейных элементов. Замена нелинейного сопротивления линейным.</p> <p>Применение метода эквивалентного генератора к расчету нелинейных цепей. Метод последовательных приближений для расчета нелинейных электрических цепей.</p>	<p>Объясняет матричные методы расчета сложных электрических цепей постоянного тока. Излагает алгоритм расчета сложных электрических цепей постоянного тока на ЭВМ.</p> <p>Описывает методы анализа нелинейных электрических цепей постоянного тока, аналитически метод расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока. Объясняет аппроксимацию характеристик нелинейных элементов.</p> <p>Описывает методы эквивалентного генератора для расчета нелинейных цепей, последовательных приближений для расчета нелинейных электрических цепей.</p>
Тема 4.2. Резонанс в электрических цепях		
<p>Сформировать знания о колебательном контуре, токе и напряжении в колебательном контуре без потерь энергии, собственной частоте колебательного контура, волновом сопротивлении, колебательном контуре с потерями энергии.</p> <p>Дать понятие о резонансе напряжений и токов, условиях и признаках резонанса напряже-</p>	<p>Колебательный контур. Ток и напряжение в колебательном контуре без потерь энергии. Собственная частота колебательного контура, волновое сопротивление. Колебательный контур с потерями энергии.</p> <p>Резонанс напряжений: условие и признаки, резонансная ча-</p>	<p>Раскрывает сущность понятий «колебательный контур», «ток и напряжение в колебательном контуре без потерь энергии», «собственная частота колебательного контура», «волновое сопротивление», «колебательный контур с потерями энергии».</p> <p>Излагает сущность резонанса напряжений и токов. Объясняет условия и признаки резо-</p>

ний и токов.	стота, частотные характеристики неразветвленной цепи, добротность контура. Резонанс токов: условие и признаки, резонансная частота, частотные характеристики параллельного контура, добротность контура	нанса напряжений и токов.
<i>Лабораторная работа № 19</i>		
Сформировать умение исследовать резонанс напряжений в электрических цепях.	Исследование резонанса напряжений в электрических цепях.	Проводит исследование резонанса напряжений в электрических цепях.
Тема 4.3. Расчет цепей с взаимной индуктивностью		
Сформировать знания о согласном и встречном включении элементов с взаимной индуктивностью, принципе разметки зажимов индуктивно связанных элементов, знаках ЭДС и напряжений, обусловленных взаимной индуктивностью, порядке расчета электрических цепей синусоидального тока при последовательном, параллельном и смешанном соединении элементов, составлении уравнений по законам Кирхгофа с учетом взаимной индуктивности.	Согласное и встречное включение элементов с взаимной индуктивностью. Разметка зажимов индуктивно связанных элементов. Знаки ЭДС и напряжений, обусловленных взаимной индуктивностью. Расчет электрических цепей синусоидального тока при последовательном, параллельном и смешанном соединении элементов. Составление уравнений по законам Кирхгофа с учетом взаимной индуктивности.	Объясняет согласное и встречное включение элементов с взаимной индуктивностью, принцип разметки зажимов индуктивно связанных элементов, знаки ЭДС и напряжений, обусловленных взаимной индуктивностью, порядок расчета электрических цепей синусоидального тока при последовательном, параллельном и смешанном соединении элементов, составление уравнений по законам Кирхгофа с учетом взаимной индуктивности.
<i>Лабораторная работа № 20</i>		
Сформировать умение исследовать электрические цепи с взаимной индуктивностью.	Исследование электрических цепей с взаимной индуктивностью.	Проводит исследование электрических цепей с взаимной индуктивностью.
Тема 4.4. Круговые диаграммы		
Дать понятие о круговых диаграммах для расчета электрических цепей синусоидального тока. Сформировать знания об алгоритме построения круговой	Применение круговых диаграмм для расчета электрических цепей синусоидального тока. Круговые диаграммы неразветвленных цепей с постоянным реактивным и переменным активным сопротивлениями, постоянным активным и переменным реактивным сопротивлениями: обоснование метода, построение круговых диаграмм. определение величин по круговой диаграмме. Круговые диаграммы разветвленных цепей с переменным активным сопротивлением, переменным реактивным сопротивлением.	Объясняет применение круговых диаграмм для расчета электрических цепей синусоидального тока. Описывает алгоритм построения круговой диаграммы

<p>диаграммы по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания для неразветвленной и разветвленной цепей.</p>	<p>Построение круговой диаграммы по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания для неразветвленной и разветвленной цепей.</p>	<p>по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания для неразветвленной и разветвленной цепей.</p>
<p>Тема 4.5. Четырехполюсники при синусоидальных токах и напряжениях</p>		
<p>Сформировать знания основных понятий четырехполюсника.</p> <p>Дать понятие об уравнениях четырехполюсника, о коэффициентах четырехполюсника, об эквивалентных схемах четырехполюсников, их параметрах, о нагрузочном режиме четырехполюсника, входном и выходном сопротивлениях, мощности и КПД четырехполюсника.</p> <p>Дать понятие о порядке испытания четырехполюсника.</p>	<p>Основные понятия о четырехполюсниках: общая схема, входные и выходные зажимы четырехполюсника, активные и пассивные четырехполюсники.</p> <p>Уравнения четырехполюсника. Коэффициенты четырехполюсника и их определение на основе режимов холостого хода и короткого замыкания. Эквивалентные схемы четырехполюсников. Т- и П-образная схема. Определение параметров эквивалентных схем. Нагрузочный режим четырехполюсника, понятие о входном и выходном сопротивлениях. Мощность и КПД четырехполюсника.</p> <p>Испытание четырехполюсника: опыты холостого хода и короткого замыкания. Нагрузочный режим как положение предельных режимов.</p>	<p>Формулирует основные понятия о четырехполюсниках.</p> <p>Описывает уравнения четырехполюсника, коэффициенты четырехполюсника его эквивалентные схемы. Излагает параметры эквивалентных схем. Описывает нагрузочном режиме четырехполюсника, раскрывает суть входном и выходном сопротивлениях.</p> <p>Описывает порядок испытания четырехполюсника.</p>
<p>Тема 4.6. Несимметричные трехфазные цепи</p>		
<p>Сформировать представление о несимметричных трехфазных цепях при соединении источника и приемника звездой и треугольником.</p> <p>Дать понятие о методе симметричных составляющих.</p> <p>Сформировать представле-</p>	<p>Несимметричная трехфазная цепь при соединении источника и приемника звездой: определение токов в цепи, применение метода узлового напряжения для расчета цепи, смещение нейтрали, определение мощности, построение топографических диаграмм с нейтральным проводом и без него.</p> <p>Несимметричная трехфазная цепь при соединении источника и приемника треугольником. Применение метода взаимного преобразования звезды и треугольника сопротивлений к расчету трехфазных цепей.</p> <p>Метод симметричных составляющих. Комплексы сим-</p>	<p>Высказывает общее суждение о несимметричных трехфазных цепях при соединении источника и приемника звездой и треугольником.</p> <p>Описывает метод симметричных составляющих.</p> <p>Высказывает общее сужде-</p>

<p>ние о комплексах симметричных составляющих, разложении несимметричной трехфазной системы векторов на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности, высших гармониках в трехфазных цепях.</p>	<p>метричных составляющих. Разложение несимметричной трехфазной системы векторов на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности. Свойства трехфазных цепей в отношении симметричных составляющих токов и напряжений.</p> <p>Высшие гармоники в трехфазных цепях.</p>	<p>ние о комплексах симметричных составляющих, разложении несимметричной трехфазной системы векторов на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности, высших гармониках в трехфазных цепях.</p>
<p>Тема 4.7. Магнитное поле переменного тока</p>		
<p>Сформировать представления о магнитном поле распределенной обмотки при постоянном токе, магнитном поле при синусоидальном токе и его разложении на два вращающихся. Сформировать понятие о зависимости скорости вращения магнитного поля от числа пар полюсов.</p> <p>Дать понятие о круговом вращающемся магнитном поле трехфазной системы обмоток.</p> <p>Сформировать знания о двухфазной системе обмоток и двухфазной системе токов для получения кругового вращающегося магнитного поля, об уравнении кругового вращающегося магнитного поля двухфазной системы обмоток.</p> <p>Сформировать представления о эллиптическом вращающемся магнитном поле и бегущем магнитном поле.</p>	<p>Магнитное поле распределенной обмотки при постоянном токе. Магнитное поле при синусоидальном токе и его разложение на два вращающихся. Зависимость скорости вращения магнитного поля от числа пар полюсов.</p> <p>Уравнение кругового вращающегося магнитного поля трехфазной системы обмоток.</p> <p>Двухфазная система обмоток и двухфазная система токов для получения кругового вращающегося магнитного поля. Уравнение кругового вращающегося магнитного поля двухфазной системы обмоток.</p> <p>Понятие об эллиптическом вращающемся магнитном поле. Бегущее магнитное поле.</p>	<p>Высказывает общее суждение о магнитном поле распределенной обмотки при постоянном токе, магнитном поле при синусоидальном токе и его разложение на два вращающихся. Объясняет зависимость скорости вращения магнитного поля от числа пар полюсов.</p> <p>Раскрывает суть кругового вращающегося магнитного поля трехфазной системы обмоток.</p> <p>Излагает знания о двухфазной системе обмоток и двухфазной системе токов для получения кругового вращающегося магнитного поля. Описывает уравнение кругового вращающегося магнитного поля двухфазной системы обмоток.</p> <p>Различает понятия эллиптического вращающегося магнитного поля и бегущего магнитного поля.</p>
<p>Тема 4.8. Анализ электрических цепей с управляемыми источниками электрической энергии</p>		
<p>Сформировать представление об управляемых источниках электрической энергии.</p> <p>Сформировать представление о схемах замещения электронных ламп, транзисторов и операционных усилителей с помощью управляемых источников.</p> <p>Познакомить с методами расчета электрических цепей, содержащих управляемые источники энергии.</p>	<p>Управляемые источники электрической энергии.</p> <p>Схемы замещения электронных ламп, транзисторов и операционных усилителей с помощью управляемых источников.</p> <p>Расчет электрических цепей, содержащих управляемые источники энергии.</p>	<p>Высказывает общие суждения об управляемых источниках электрической энергии.</p> <p>Различает схемы замещения электронных ламп, транзисторов и операционных усилителей с помощью управляемых источников.</p> <p>Называет методы расчета электрических цепей, содержащих управляемые источники энергии.</p>
<p>Тема 4.9. Электрические цепи с распределенными параметрами</p>		

<p>Сформировать представление об электрических цепях с распределенными параметрами, о схемах замещения однородной линии с потерями и без них.</p> <p>Сформировать представление об основных уравнениях длинной линии и её характеристиках.</p> <p>Сформировать представление о длинной линии без потерь и ее режимах, уравнениях линии без потерь, холостом ходе линии, понятии прямой и обратной волнах напряжения и тока линии. Познакомить с параметрами и характеристиками линии, коротким замыканием линии, режимами с согласованной нагрузкой, несогласованной активной нагрузкой. Сформировать представление о коэффициенте отражения и преломления электромагнитных волн в линии, распространении электромагнитной волны с прямоугольным фронтом по линии без потерь.</p>	<p>Понятие о распределенных параметрах. Примеры электрических цепей с распределенными параметрами. Схемы замещения однородной линии с потерями и без них.</p> <p>Основные уравнения длинной линии и их анализ. Характеристики длинной линии: коэффициенты распространения электромагнитной волны, затухания и фазы, волновое сопротивление линии.</p> <p>Длинная линия без потерь и ее режимы. Уравнения линии без потерь. Холостой ход линии. Понятие о прямой и обратной волнах напряжения и тока линии. Фазовая скорость и длина волны, их выражения через параметры линии. Короткое замыкание линии. Режимы согласованной нагрузкой, несогласованной активной нагрузкой. Понятие о коэффициентах отражения и преломления электромагнитных волн в линии. Краткие сведения о распространении электромагнитной волны с прямоугольным фронтом по линии без потерь.</p>	<p>Высказывает общие суждения об электрических цепях с распределенными параметрами, о схемах замещения однородной линии с потерями и без них.</p> <p>Высказывает общее суждение об основных уравнениях длинной линии и её характеристиках.</p> <p>Высказывает общие суждения о длинной линии без потерь и ее режимах, уравнениях линии без потерь, холостом ходе линии, прямой и обратной волнах напряжения и тока линии, характеристиках линии, коротком замыкании линии, режимах с согласованной нагрузкой, несогласованной активной нагрузкой, коэффициентах отражения и преломления электромагнитных волн в линии, распространении электромагнитной волны с прямоугольным фронтом по линии без потерь</p>
---	--	---

ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

Раздел и тема	Специальность			
	Монтаж и эксплуатация электрооборудования (по направлениям) Городской электрический транспорт Автоматизированные электроприводы		Микроэлектроника	
	Количество учебных часов			
	Всего	В т. ч. на лабораторные работы	Всего	В т. ч. на лабораторные работы
Введение	1		1	
1. Линейные и нелинейные электрические цепи постоянного тока	47	14	33	12
1.1. Физические процессы в электрических цепях	13	4	10	4
1.2. Расчет линейных электрических цепей постоянного тока	26	8	20	8
1.3. Нелинейные электрические цепи постоянного тока	8	2	3	
2. Электрическое и магнитное поле	24	4	20	4
2.1. Электростатическое поле в пустоте	2		2	
2.2. Электростатическое поле в диэлектрике	2		2	
2.3. Электростатические цепи	4	2	4	2
2.4. Магнитное поле в неферромагнитной среде	2		2	
2.5. Магнитное поле в ферромагнитной среде	4			
2.6. Магнитные цепи				
2.7. Электромагнитная индукция	6	2	6	2
<i>Обязательная контрольная работа №1</i>	3		3	
	1		1	
3. Линейные и нелинейные электрические цепи переменного тока	78	18	60	14
3.1. Основные сведения о синусоидальном электрическом токе	4		2	
3.2. Элементы электрических цепей переменного тока и их параметры	20	10	8	2
3.3. Расчет электрических цепей				

переменного тока с помощью векторных диаграмм	4		16	8
3.4. Расчет электрических цепей синусоидального тока с применением комплексных чисел				
3.5. Трехфазные симметричные цепи	12		4	
3.6. Электрические цепи с несинусоидальными периодическими напряжениями и токами	12	4	14	4
3.7. Нелинейные электрические цепи переменного тока	6		4	
3.8. Переходные процессы в электрических цепях <i>Обязательная контрольная работа №2</i>	7	2	4	
	12	2	7	
	1		1	
4. Темы, отражающие связь со специальностью (по выбору)	22	4	6	
4.1. Некоторые методы анализа сложных электрических цепей постоянного тока	2			
4.2. Резонанс в электрических цепях	6	2	2	
4.3. Расчет цепей с взаимной индуктивностью	4	2		
4.4. Круговые диаграммы				
4.5. Четырехполюсники при синусоидальных токах и напряжениях				
4.6. Несимметричные трехфазные цепи				
4.7. Магнитное поле переменного тока	10		4	
4.8. Анализ электрических цепей с управляемыми источниками электрической энергии				
4.9. Электрические цепи с распределенными параметрами				
Курсовая работа	20			
Итого	192	40	120	30

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

по дисциплине «Теоретические основы электротехники»

для учащихся специальности

2-36 04 32 «Электроника механических транспортных средств»

Раздел, тема	Количество часов	
	Всего часов	В том числе на практические работы
1	2	3
Введение	1	
Раздел 1 Линейные и нелинейные электрические цепи постоянного тока	48	12
1.1. Физические процессы в электрических цепях	9	
<i>Лабораторная работа №1</i> Изучение оборудования лаборатории, методов подбора аппаратуры и измерительных приборов для сборки схем.		2
<i>Лабораторная работа №2</i> Исследование режимов электрической цепи и ее элементов (неразветвленной электрической цепи с переменным сопротивлением приемника энергии).		2
1.2. Расчет линейных электрических цепей постоянного тока	22	
<i>Лабораторная работа №3</i> Исследование электрических цепей при последовательном и параллельном соединении сопротивлений		2
<i>Лабораторная работа №4</i> Изучение законов Кирхгофа в применении к многоконтурной цепи.		2
<i>Лабораторная работа №5</i> Измерение потенциалов в неразветвленной электрической цепи		2
1.3. Нелинейные электрические цепи постоянного тока	4	
<i>Лабораторная работа №6</i> Снятие вольтамперных характеристик нелинейных элементов и проверка опытным путем нелинейных цепей		2
<i>Обязательная контрольная работа №1</i>	1	
Раздел 2 Электрическое и магнитное поле	21	4
2.1. Электростатическое поле в пустоте	1	

2.2.Электростатическое поле в диэлектрике	2	
2.3.Электростатические цепи	2	
<i>Лабораторная работа №7</i> Исследование электростатических цепей при последовательном, параллельном и смешенном соединении конденсаторов.		2
2.4.Магнитное поле в неферромагнитной среде	2	
2.5.Магнитное поле в ферромагнитной среде	2	
2.6.Магнитные цепи	6	
<i>Лабораторная работа №8</i> Исследование магнитной цепи.		2
2.7.Электромагнитная индукция	2	
Раздел 3 Линейные и нелинейные электрические цепи переменного тока	70	14
3.1.Основные сведения о синусоидальном электрическом токе	2	
3.2.Элементы электрических цепей переменного тока и их параметры	10	
<i>Лабораторная работа №9</i> Измерение параметров катушки индуктивности		2
<i>Лабораторная работа №10</i> Изучение цепи переменного тока с активным сопротивлением и емкостью.		2
<i>Лабораторная работа №11</i> Изучение цепи переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью		2
<i>Лабораторная работа №12</i> Исследование цепи переменного тока при последовательном соединении катушки индуктивности и конденсатора.		2
<i>Лабораторная работа №13</i> Исследование цепи переменного тока при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора.		2
3.3.Расчет электрических цепей переменного тока с помощью векторных диаграмм	6	
3.4.Расчет электрических цепей синусоидального тока с применением комплексных чисел	6	
3.5.Трехфазные симметричные цепи	11	
<i>Лабораторная работа №14</i> Исследование трехфазной цепи при соединении приемника		2

звездой.		
<i>Лабораторная работа №15</i> Исследование трехфазной цепи при соединении приемника треугольником		2
3.6.Электрические цепи с несинусоидальными напряжениями и токами	4	
3.7.Нелинейные электрические цепи переменного тока	4	
3.8.Переходные процессы в электрических цепях	12	
<i>Обязательная контрольная работа №2</i>	1	
Курсовая работа	20	
ИТОГО	160	30

ДЕСЯТИБАЛЛЬНАЯ ШКАЛА И ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОБУЧАЮЩИХСЯ В УЧРЕЖДЕНИЯХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОЛУЧЕНИЕ СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Отметка в баллах	Показатели оценки
1 (один)	Узнавание отдельных объектов изучения программного учебного материала, предъявленных в готовом виде (электрических схем включения, специальных терминов, понятий, определений, формул, законов и т.д.).
2 (два)	Различение объектов изучения программного учебного материала, предъявленных в готовом виде (понятий электрического и магнитного поля, условные графические обозначения элементов электрических цепей, единицы электрических и электромагнитных величин, и т.д.); осуществление соответствующих практических действий.
3 (три)	Воспроизведение части программного материала по памяти (фрагментарный пересказ понятий электрические цепи, их классификация, понятий электрического и магнитного поля и т.д.); осуществление умственных и практических действий по образцу (выполнение расчетов тока, сопротивления, напряжения и т.д.).
4 (четыре)	Воспроизведение большей части программного учебного материала (описание с элементами объяснения электрических схем, электрических и электромагнитных явлений, законов т.д.); применение знаний в знакомой ситуации по образцу (определение тока, сопротивления, напряжения для простейшей электрической цепи и т.д.); наличие единичных существенных ошибок.
5 (пять)	Осознанное воспроизведение большей части программного учебного материала (описание электрических схем с объяснением принципа работы и т.д.); применение знаний в знакомой ситуации по образцу (расчет токов в электрической цепи различными методами и т.д.); наличие несущественных ошибок.
6 (шесть)	Полное знание и осознанное воспроизведение всего программного учебного материала; владение программным учебным материалом в знакомой ситуации (описание электрических схем с объяснением принципа работы, расчет токов в электрической цепи различными методами, построение векторных диаграмм и т.д.; выполнение заданий по образцу, на основе предписаний); наличие несущественных ошибок.
7 (семь)	Полное, прочное знание и воспроизведение программного учебного материала; владение программным учебным материалом в знакомой ситуации (развернутое описание электрических схем с объяснением принципа работы раскрытие сущности физических

	<p>процессов, происходящих в цепях постоянного и переменного тока, формулирование выводов и т. д.; недостаточно самостоятельное выполнение заданий (расчет токов в электрической цепи различными методами, построение векторных диаграмм с объяснением и т.д.); наличие единичных несущественных ошибок.</p>
8 (восемь)	<p>Полное, прочное, глубокое знание и воспроизведение программного учебного материала; оперирование программным учебным материалом в знакомой ситуации (развернутое описание электрических схем с объяснением принципа работы, раскрытие сущности и анализ физических процессов, происходящих в цепях постоянного и переменного тока, формулирование выводов самостоятельное выполнение заданий (расчет токов в электрической цепи при различных режимах работы с анализом и аргументацией результатов и т.д.); наличие единичных несущественных ошибок.</p>
9 (девять)	<p>Полное, прочное, глубокое, системное знание программного учебного материала; оперирование программным учебным материалом в частично измененной ситуации (применение учебного материала при выдвижении предположений и гипотез, поиске новых способов и рациональных путей решения учебных задач, при выполнении заданий творческого характера и т.д.)</p>
10 (десять)	<p>Свободное оперирование программным учебным материалом; применение знаний и умений в незнакомой ситуации (самостоятельные действия по описанию, объяснению нестандартных или новых способов решения учебных задач, выполнение творческих работ и заданий и т.д.)</p>

ЛИТЕРАТУРА

1. Евдокимов, Ф.Е. Теоретические основы электротехники / Ф.Е. Евдокимов – Москва: “ACADEMIA”, 2004. – 560с.
2. Лоторейчук, Е.А. Теоретические основы электротехники / Е.А. Лоторейчук. – М.: НД «Форум»: ИНФРА-М, 2008. –320 с.
3. Шмакова, Т.С. Теоретические основы электротехники. Рабочая тетрадь. Пособие. / Т.С. Шмакова, Е.С. Гутько. – 5-е изд., стер. – Минск: РИПО, 2018. – 72с.

ПЕРЕЧЕНЬ СУЩЕСТВЕННЫХ И НЕСУЩЕСТВЕННЫХ ОШИБОК

по дисциплине «Теоретические основы электротехники» для специальностей

2-36 03 31 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования»,

2-36 04 32 «Электроника механических транспортных средств»,

2-37 03 31 «Городской электрический транспорт», 2-41 01 31 «Микроэлектроника»,

2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы».

Существенные ошибки:

В изложении теоретического материала:

- затруднения в изложении учащимися основных положений теории электротехники;
- ошибки в изложении основных электротехнических терминов, понятий и определений;
- отсутствие в ответе цельности, логичности и законченности;
- ошибки при пояснении структурных схем;
- ошибки в формулах;
- ошибки при написании единиц измерения величин;
- ошибки в преобразовании формул;
- ошибки в расчетах;
- затруднение при работе со справочной литературой;
- отсутствие поясняющих решений;
- ошибки в преобразовании одной единицы в другую;
- ошибки, приводящие к искажению сути, рассматриваемого процесса, явления, закономерности.

При выполнении практических работ:

- несоблюдение нормативно-методических документов при выполнении лабораторных и практических работ;
- нарушение последовательности действий при выполнении лабораторных работ;
- ошибки в вычислениях и расчетах приводящие к абсурдным результатам;
- затруднения при оценке полученного результата и формулировке вывода при выполнении лабораторной работы;
- ошибки в преобразовании формул при выполнении практических работ по электротехнике.

Несущественные ошибки:

В изложении теоретического материала:

- неточности и неполное изложение основных электротехнических понятий, определений;
- неполное изложение программного учебного материала;
- искажение содержания учебного материала;
- нерациональное изложение учебного материала;

При выполнении практических работ:

- неточности в оформлении работ;
- небрежное выполнение записей, схем, рисунков;
- применение нерационального способа решения задач;
- ошибки при записи физических терминов;
- ошибки вычислительного характера, не приводящие к абсурдным результатам.

ПЕРЕЧЕНЬ СРЕДСТВ ОБУЧЕНИЯ

Примерный перечень оснащения кабинета (лаборатории)

Технические средства обучения

Технические устройства*

Доска интерактивная

Персональный компьютер

Мультимедийный комплекс

Дидактическое обеспечение

Презентации

Слайды электронные

Учебные видеофильмы

Методические указания для проведения практических и лабораторных работ

Электронные средства обучения

Программное обеспечение

Программа для создания, редактирования и просмотра презентаций

Программное обеспечение для просмотра веб-сайтов

Электронный эмулятор электрических цепей

Электронно-учебное пособие по учебной дисциплине «Теоретические основы электротехники»

Печатные средства обучения

Плакаты

Комплект учебно-календарных пособий по учебной дисциплине «Теоретические основы электротехники»

Учебно-производственное оборудование

Стенд лабораторный «Теоретические основы электротехники» НТЦ-01.07

*При отсутствии использовать специализированную аудиторию технических средств обучения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

ВВЕДЕНИЕ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ

Электротехника – это наука о производстве, передаче и практическом использовании электрической энергии. Данная учебная дисциплина является теоретической базой для изучения предметов специального цикла. Его изучение базируется на учебном материале ряда общеобразовательных и естественно-научных предметов и, прежде всего, математики и физики.

Цель изучения дисциплины – изучить основные сведения об электрических и магнитных цепях, электрических и электронных устройствах, производстве, распределении и потреблении электроэнергии, знание которых необходимо квалифицированному рабочему. Программой учебной дисциплины «Теоретические основы электротехники.» предусматривается изучение физических законов, линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей постоянного и переменного тока, методов их расчета и практического использования; формирование у специалиста правильного подхода к постановке и решению проблем эффективного использования топливно-энергетических ресурсов на основе мирового опыта и государственной политики в области энергосбережения.

Электрическая энергия получается путём преобразования других видов энергии (механической, тепловой, химической, ядерной и др.) и обладает ценными свойствами: легко получить их других видов энергии, передается, с малыми потерями передаётся на большие расстояния, легко распределяется по потребителям, преобразуется в нужный вид энергии (механическую, тепловую, химическую и другие виды энергии), проста в регулировке и контроле, электроэнергия является наиболее чистым видом энергии и наименьшей степени загрязняет окружающую среду.

Электрическую энергию можно получить с помощью природных энергетических ресурсов – рек и водопадов, океанских приливов, органического и ядерного топлива, солнечной радиации, ветра, геотермальных источников. В больших количествах электрическую энергию получают на электростанциях с помощью генераторов – преобразователей механической энергии в электрическую.

На гидроэлектростанциях (ГЭС) механическая от гидротурбин поступает к электрогенераторам, которые воспринимают возобновляемую энергию течения рек. На теплоэлектростанциях (ТЭС) при сжигании органического топлива тепловая энергия преобразуется в механическую и передается в электрогенератор. На атомных электростанциях (АЭС) тепловую энергию получают из ядер атомов.

Электроэнергию производят также ветроэлектростанции, использующие энергию ветра, приливные – работающие за счёт морских приливов, геотермальные – использующие тепло земных недр, солнечные – преобразующие солнечную радиацию в электроэнергию. В общем объёме производства электроэнергии эти электростанции занимают незначительную долю. Однако они являются экологически чистыми и используемые ими источники энергии практически неисчерпаемы.

Для передачи электроэнергии на расстояния и распределения её между электроприёмниками используются линии электропередач, трансформаторы, аппаратура управления, контроля, защиты. Электрическая энергия широко используется в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте, в быту.

ТЕМА 1 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

1.1 Электрическое поле. Характеристики электрического поля

При изучении учебной дисциплины «Теоретические основы электротехники» придётся неоднократно обращаться к таким понятиям, как электрическое поле, напряжённость электрического поля, электрическое напряжение, ёмкость и др.

Электрический заряд – физическая величина, определяющая интенсивность электромагнитных взаимодействий, подобно тому как масса определяет интенсивность гравитационных взаимодействий. Заряд обозначается буквой Q (q) и измеряется в кулонах (Кл). Различают положительные и отрицательные заряды. Разноимённо заряженные тела притягиваются друг к другу, а одноимённые – отталкиваются.

Электрическое поле как одна из составляющих электромагнитного поля обладает способностью воздействовать как на неподвижные, так и на движущиеся заряды.

В соответствии с законом Кулона на пробный заряд в вакууме (рис 1.1) действует сила:

$$F = \frac{Qq}{4\pi r^2 \epsilon \epsilon_0},$$

где F – сила взаимодействия зарядов в ньютонах (Н), r – расстояние между зарядами в метрах (м), Q и q – величины электрических зарядов в кулонах (Кл), $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м – электрическая постоянная, величина которая определяется выбором системы единиц; ϵ_0 – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Закон Кулона: сила взаимодействия между двумя точечными зарядами прямо пропорциональна произведению величин этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

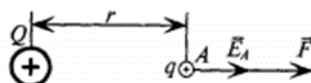


Рисунок 1.1 – Электрическое поле и сила взаимодействия электрических зарядов

Интенсивность электрического поля в данной точке оценивается отношением F/q , называемым напряжённостью поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Напряжённость электрического поля в данной точке численно равна силе, с которой поле действует на помещённый в эту точку единичный положительный заряд. Напряжённость – векторная величина. Единица измерения напряжённости – вольт на метр (В/м).

Для наглядного изображения электрического поля пользуются линиями напряжённости (рис. 1.2), которые проводят таким образом, чтобы векторы напряжённости поля совпадали с касательными в каждой точке этих линий. На рисунке 1.2 показаны примеры электрического поля, изображенного при помощи силовых линий. Нужно помнить, что силовые линии электрического поля – это лишь способ графического изображения поля.

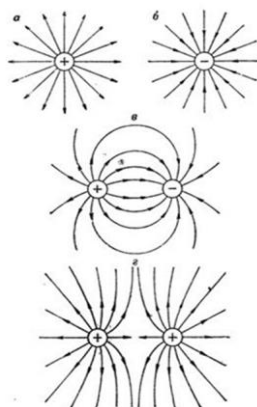


Рисунок 1.2 – Примеры изображения электрического поля при помощи силовых линий: а – электрическое поле одиночного положительного заряда, б – электрическое поле одиночного отрицательного заряда, в – электрическое поле двух разноименных зарядов, г – электрическое поле двух одноименных зарядов.

Напряжённость электрического поля, созданного несколькими зарядами в какой-либо точке А этого поля, определяется геометрической суммой напряжённостей, созданных в этой точке каждым точечным зарядом: $\vec{E}_A = \vec{E}_{A1} + \vec{E}_{A2} + \dots + \vec{E}_{Ak}$.

Электрическое поле всегда сообщает движение заряду, если силы поля, действующие на заряд, не уравновешиваются какими-либо сторонними силами. Это говорит о том, что электрическое поле обладает потенциальной энергией, т. е. способностью совершать работу. Энергия электрического поля, отнесенная к единице положительного заряда, помещенного в данную точку поля, и называется потенциалом поля в данной его точке.

Если потенциал обозначить буквой φ , заряд – буквой q и затраченную на перемещение заряда работу – A , то потенциал поля в данной точке выразится формулой

$$\varphi = \frac{A}{q}.$$

Потенциал – скалярная величина. Потенциал поля измеряется в вольтах (В). Практическое значение имеет не сам потенциал в точке, а изменение потенциала вдоль пути из одной точки поля в другую, т.е. разность потенциалов, называемая также напряжением и обозначаемая U :

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = El$$

где l – расстояние между точками.

Единица напряжения и потенциала – вольт (В).

Между напряжённостью электрического поля и разностью потенциалов существует определённая взаимосвязь:

$$E = \frac{U_{AB}}{l}$$

1.2 Электрический ток, электропроводность. Проводники, полупроводники и диэлектрики

Электрический ток – это явление направленного движения заряженных частиц. Количественной характеристикой электрического тока служит сила тока – величина заряда, переносимого через рассматриваемую поверхность в единицу времени.

Для возникновения и прохождения электрического тока необходимо:

1. Наличие в проводнике носителей зарядов, которые могут перемещаться – свободных электронов в металлах, ионов и свободных электронов в электролитах.

2. Наличие в проводнике электрического поля, действующего на заряженные частицы с силой $F = qE$.

Действие тока: тепловое, химическое, магнитное.

По способности проводить электрический ток вещества делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики.

Способность проводника проводить электрический ток называется электропроводностью. По электропроводности все вещества делятся на проводники, диэлектрики и полупроводники. Проводники обладают высокой электропроводностью.

Если проводник поместить в электрическое поле, то под действием сил этого поля происходит перемещение зарядов проводнике: положительных – в направлении внешнего поля, отрицательных – в противоположном направлении (рис. 1.3а). Разделённые внутри проводника заряды создают свое электрическое поле, направленное от положительных зарядов к отрицательным, т.е. против внешнего поля.

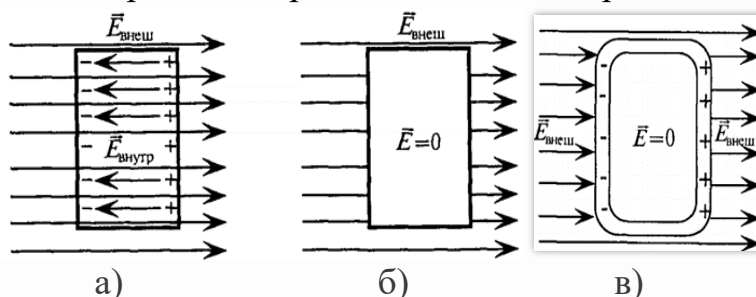


Рисунок 1.3 – Проводник в электрическом поле

Разделение зарядов в проводнике прекратится тогда, когда напряжённость поля разделённых зарядов $E_{внутр}$ станет равной напряжённости внешнего поля в проводнике $E_{внеш}$, т.е. $E_{внутр} = E_{внеш}$, а результирующее поле $E = E_{внутр} - E_{внеш} = 0$

Таким образом, результирующее поле внутри проводника станет равным нулю (рис. 1.3б). На этом принципе работает электрический экран, защищающий часть пространства от внешних электрических полей (рис. 1.3в).

По значению удельного электрического сопротивления полупроводники занимают промежуточное положение между хорошими проводниками и диэлектриками.

Электропроводность диэлектриков практически равна нулю в силу весьма сильной связи между электронами и ядром атомов диэлектрика. Если диэлектрик поместить в электростатическое поле, то в нем произойдет поляризация атомов (рис. 1.4), т.е. смещение разноименных зарядов в атоме (но не разделение их). Поляризованный атом (молекула) может рассматриваться как диполь. Поляризованные атомы создают свое электрическое поле, напряженность которого $E_{внутр}$ направлена против внешнего поля. В результате поляризации результирующее поле внутри диэлектрика ($E_{внеш} - E_{внутр}$) ослабляется.



Рисунок 1.4 – Диэлектрик в электростатическом поле

Интенсивность поляризации диэлектрика зависит от его диэлектрической проницаемости. Чем больше диэлектрическая проницаемость, тем интенсивней поляризация в диэлектрике и тем слабее электрическое поле в нем:

$$E = E_{\text{внутр}} - E_{\text{внеш}} \neq 0$$

Если диэлектрик поместить в сильное электрическое поле, напряженность которого можно увеличивать, то при какой-то напряженности произойдет пробой диэлектрика, при котором электроны отрываются от атома, т.е. происходит ионизация диэлектрика. Таким образом диэлектрик становится проводником.

1.3 Электрическая цепь. Ток в электрической цепи. Плотность тока

Основными элементами электрической цепи является: источник электрической энергии; потребители; устройство для передачи электрической энергии.

В источниках электрической энергии происходит преобразование различных видов энергии в электрическую.

Все основные элементы электрической цепи обладают электрическим сопротивлением. Кроме основных элементов электрические цепи содержат вспомогательные элементы: предохранители, рубильники, выключатели, переключатели, измерительные приборы (амперметры, вольтметры, счетчики) и др.

Графическое изображение электрической цепи, содержащее условные обозначения ее элементов, называется схемой электрической цепи. Все основные и вспомогательные элементы в схемах электрических цепей имеют условные обозначения, представленные на таблице 1.1. Схема электрической цепи показана на рисунке 1.5.

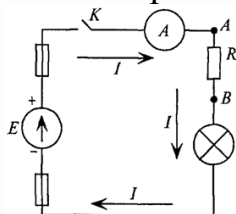


Рисунок 1.5 – Схема электрической цепи

В электрической цепи различают два участка: внутренний и внешний. Источник является внутренним участком электрической цепи. Все остальные элементы относятся к внешнему участку электрической цепи.

Электрический ток – это явление упорядоченного (направленного) перемещения заряженных частиц в проводнике под действием электрического поля.

Обозначается величина постоянного тока буквой I , а переменного – i (мгновенное значение). Величина тока I определяется количеством электричества (зарядов) Q , проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени t :

$$I = \frac{Q}{t}, \quad i = \frac{dQ}{dt}$$

$$[I] = \left[\frac{Q}{t} \right] = \frac{Kл}{c} = 1A$$

Постоянным называется ток, величина и направление которого не изменяется с течением времени.

Таблица 1.1 – Условные графические обозначения, применяемые в электрических схемах

Наименование	Условный знак
Источник электрической энергии, источник ЭДС	
Электрический генератор постоянного тока	
Химический источник энергии	
Электрический двигатель постоянного тока	
Электрическая лампа накаливания	
Приёмник электрической энергии, резистор	
Реостат регулируемый	
Резистор переменный	
Конденсатор: 1) Постоянной ёмкости 2) Переменной ёмкости	1) 2)
Катушка индуктивности: 1) Без магнитопровода 2) С магнитопроводом	1) 2)
Провод, кабель, шина электрической цепи	
Соединение электрическое	
Соединение разъёмное	

Отношение величины тока в проводнике I к площади его поперечного сечения S характеризует плотность тока в этом проводнике. Обозначается плотность тока буквой j .

$$j = \frac{I}{S}.$$

$$[j] = \left[\frac{I}{S} \right] = 1\text{А} / \text{м}^2.$$

Так как на практике площадь сечения проводов обычно выражают в мм^2 , то плотность тока выражают $[j] = 1\text{А} / \text{мм}^2$

Плотность тока – векторная физическая величина, имеющая смысл силы тока, протекающего через элемент поверхности единичной площади.

1.4 ЭДС и напряжение в электрической цепи. Электродвижущая сила.

Энергия и мощность электрического тока. Баланс мощностей

Источник электрической энергии осуществляет направленное перемещение электрических зарядов по всей замкнутой цепи (рис. 1.6).

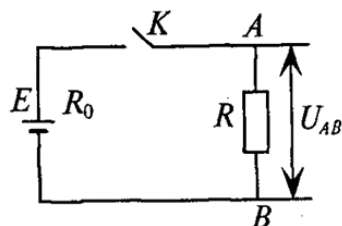


Рисунок 1.6 – Схема электрической цепи

Энергия W , которую затрачивает или может затратить источник на перемещение единицы положительного заряда по всей замкнутой цепи, характеризует электродвижущую силу источника E (ЭДС):

$$E = \frac{W_{\text{ист}}}{q}$$
$$[E] = \left[\frac{W}{q} \right] = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1\text{В (вольт)}$$

Энергия, затраченная на перемещение единицы положительного заряда на каком-либо участке замкнутой цепи, характеризует напряжение или падение напряжения на этом участке (внутреннем или внешнем):

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$$

Для того чтобы поддерживать ток в цепи достаточно долго, необходимо осуществить движение зарядов по замкнутой траектории. Следовательно, в замкнутой цепи должны быть участки, на которых носители заряда будут двигаться против сил электростатического поля, то есть от точек с меньшим потенциалом к точкам с большим потенциалом. Это возможно лишь при наличии неэлектрических сил, называемых сторонними силами.

Физическая величина, равная работе сторонних сил при перемещении единичного заряда на данном участке цепи, называется электродвижущей силой (ЭДС), действующей на этом участке:

$$E = \frac{A}{q},$$

где E – ЭДС, В

В замкнутой электрической цепи источник затрачивает электрическую энергию $W_{\text{ист}}$ на перемещение единицы положительного заряда по всей замкнутой цепи, т.е. на внутреннем и внешнем участках (рис. 1.7). ЭДС источника определяется выражением.

$$E = \frac{W_{\text{ист}}}{q}$$

Энергия, затраченная источником, равна

$$W_{\text{ист}} = Eq = EIt,$$

где $q = It$.

Энергия источника расходуется на потребители (полезная энергия):

$$W = Uq = UIt$$

А на внутреннем сопротивлении источника (потери):

$$W_0 = U_0q = U_0It$$

Из закона сохранения энергии следует:

$$W_{ucm} = W + W_0$$

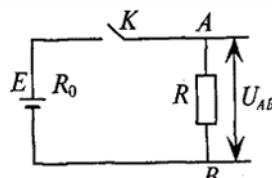


Рисунок 1.7 – Схема электрической цепи

Скорость преобразования энергии определяет электрическую мощность элементов электрической цепи:

$$P = \frac{W}{t}$$

Обозначается электрическая мощность буквой P , а единицей электрической мощности является ватт, другими словами, $[P]=1$ Вт (Ватт).

Мощность источника электрической энергии определяется выражением

$$P_{ucm} = \frac{W_{ucm}}{q} = \frac{EIt}{t} = EI$$

Мощность потребителя, т.е. полезная, потребляемая мощность, будет равна

$$P = \frac{W}{q} = \frac{UIt}{t} = UI$$

Если воспользоваться законом Ома для участка электрической цепи, то полезную мощность можно определить следующим выражением:

$$P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$$

Единицей измерения электрической энергии является

$$[W] = [Pt] = 1 \text{ Вм} \cdot \text{с}$$

Коэффициент полезного действия электрической цепи η определяется отношением полезной мощности (мощности потребителя) ко всей затраченной мощности (мощности источника)

$$\eta = \frac{P}{P_{ucm}} 100\%$$

В любой электрической цепи должен соблюдаться энергетический баланс – баланс мощностей: алгебраическая сумма мощностей всех источников равна арифметической сумме мощностей всех приемников энергии: $P_{ucm} = P_{np}$

Рассмотрим схему электрической цепи, изображенную на рисунке 1.8.

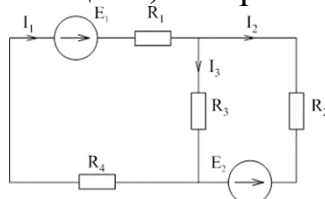


Рисунок 1.8 – Схема электрической цепи

Составим уравнение баланса мощностей для данной схемы:

$$E_1 I_1 - E_2 I_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4.$$

В левой части равенства слагаемое берется со знаком "+" если E и I совпадают по направлению и со знаком "-" если не совпадают. Баланс мощностей используют для проверки правильности расчета электрических цепей.

1.5 Закон Ома. Электрическое сопротивление. Закон Джоуля-Ленца

Любую электрическую цепь можно охарактеризовать силой тока, напряжением и сопротивлением. Между этими величинами существует связь, которую впервые теоретически и экспериментально установил немецкий ученый Георг Ом.

Закон Ома: сила ток на участке электрической цепи прямо пропорциональна напряжению на этом участке и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка:

$$I = \frac{U_{AB}}{R_{AB}}.$$

Электрическое сопротивление проводника – это противодействие, которое атомы или молекулы проводника оказывают направленному перемещению зарядов.

Электрическое сопротивление обозначается буквой R . Единицей измерения является Ом.

Сопротивление R зависит от длины проводника l , площади поперечного сечения S и материала проводника ρ :

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление проводника, зависящее от свойства материала проводника.

$$[\rho] = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Величину, обратную сопротивлению, называют проводимостью

$$g = \frac{1}{R}.$$

$$[g] = 1 \text{ См (сименс)}.$$

Сопротивление проводников зависит от их температуры. Сопротивление проводника при любой температуре (с достаточной степенью точности при изменении температуры в пределах $0 \div 100$ °C) можно определять выражением

$$R_2 = R_1 + R_1 \alpha (t_2^0 - t_1^0),$$

где R_2 – сопротивление проводника при конечной температуре t_2^0 ; R_1 – сопротивление проводника при начальной температуре t_1^0 ; α – температурный коэффициент сопротивления.

Для замкнутой электрической цепи, изображенной на рисунке 1.9, ЭДС источника можно определить выражение

$$E = U_0 + U = IR_0 + IR = I(R_0 + R),$$

где R_0 – сопротивление источника; R – сопротивление потребителя (сопротивлением проводов пренебрегают).

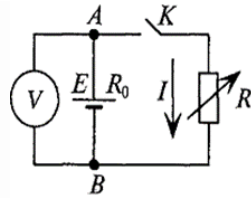


Рисунок 1.9 – Схема электрической цепи

Ток в замкнутой цепи равен

$$I = \frac{E}{R_0 + R}.$$

Данное выражение является математическим выражением закона Ома для замкнутой цепи.

В проводах линии передачи электрической энергии, обмоток якорей и полюсов электрических машин, электробытовых приборов и других потребителей происходит преобразование электрической энергии в тепловую. Ток I , протекая по проводнику с сопротивлением R , нагревает этот проводник. За время t в этом проводнике выделяется тепло, количество которого определяется количеством электрической энергии, затраченной в этом проводнике, т. е.

$$Q = W = Pt = I^2Rt,$$

где Q – количество тепла, выделенного в проводнике, Дж.

Приведенная зависимость является математическим выражением закона Джоуля-Ленца.

Закон Джоуля-Ленца устанавливает зависимость между количеством тепла и электрической энергией: количества тепла, выделенное током в проводнике, пропорционально квадрату тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока по проводнику.

1.6 Электрическая цепь и ее элементы.

Режимы работы элементов и электрических цепей

Электрическая цепь – это совокупность устройств и объектов, образующих путь электрического тока. Отдельное устройство, входящее в состав электрической цепи и выполняющее в ней определенную функцию, называется элементом электрической цепи.

Простейшей электрической цепью состоит из следующих элементов: 1 – источник электрической энергии; 2 – приемники электрической энергии; 3 – соединительные провода (рис. 1.10).

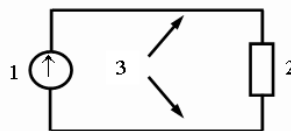


Рисунок 1.10 – Простейшая электрическая цепь

Источник электрической энергии дает электрическую энергию, потребитель эту энергию преобразует в другие виды энергии: свет, тепло, движение и т. д.

Схема электрической цепи – это графическое изображение электрической цепи, содержащее условные обозначения ее элементов, показывающее соединения этих элементов.

Типы схем: структурная; функциональная; принципиальная; монтажная и др.

На принципиальной схеме приводится полный состав элементов и указаны все связи между ними.

Функциональные электрические схемы – это наиболее общие схемы в отношении уровня абстракции и обычно показывают лишь функциональные связи между составляющими данного объекта и раскрывающими его сущность и дающие представление о функциях объекта, изображённого на данном чертеже.

Принципиальные электрические схемы – это чертежи, показывающие полные электрические и магнитные и электромагнитные связи элементов объекта, а также параметры компонентов, составляющих объект, изображённый на чертеже.

Монтажные схемы – это чертежи, показывающие реальное расположение компонентов как внутри, так и снаружи объекта, изображённого на схеме.

Наиболее характерными для электрических цепей являются следующие режимы работы: номинальный, рабочий, холостого хода и короткого замыкания.

Номинальным называется режим, при котором данный элемент электрической цепи работает со значениями различных величин (тока, напряжения и др.), на которые он рассчитан заводом-изготовителем, а которые называются его номинальными (или техническими) данными. Номинальные данные указываются в справочной литературе, технической документации или на самом элементе.

Рабочим называется режим, при котором мощность, отдаваемая источником или потребляемая приемником, достигает максимального значения.

Под режимом холостого хода понимается такой режим, при котором приемник отключен от источника. При этом источник не отдает энергию во внешнюю цепь, а приемник не потребляет ее.

Режимом короткого замыкания называется режим, возникающий при соединении между собой выводов источника, приемника или соединительных проводов, а также иных элементов электрической цепи, между которыми имеется напряжение. При этом сопротивление в месте соединения оказывается практически равным нулю. Режим короткого замыкания в электрических установках нежелателен так как он приводит к большому току (больше номинального), т. е. к резкому увеличению выделения тепла и выходу из строя аппаратуры.

Параметры, характеризующие работу электрической цепи (рис. 1.11) при различных режимах, определяются следующими выражениями.

Ток в замкнутой цепи

$$I = \frac{E}{R_0 + R}$$

Напряжение на клеммах источника

$$U = E - IR_0$$

Падение напряжения на сопротивлении источника

$$U_0 = IR_0$$

Полезная мощность (мощность потребителя)

$$P = P_{\text{ист}} + P_0 = EI - I^2 R_0.$$

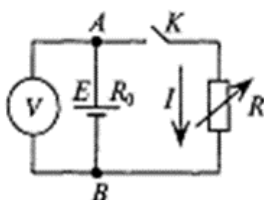


Рисунок 1.11 – Схема электрической цепи

Исследуем изменение этих величин при изменении сопротивления R от бесконечности (режим холостого хода) до нуля (режим короткого замыкания).

1. В режиме холостого хода (ключ K разомкнут) $R = \infty$

$$I_{xx} = 0; U = E; U_0 = 0; P = 0$$

2. В режиме короткого замыкания $R=0$

$$I_{кз} = \frac{E}{R_0}; U = E - \frac{E}{R_0} R_0 = 0; U_0 = \frac{E}{R_0} R_0 = E; P = E \frac{E}{R_0} - \frac{E^2}{R_0^2} R_0 = 0.$$

Максимальная полезная мощность выделяется при $R = R_0$

При максимальной отдаче мощности ток в цепи равен

$$I = \frac{E}{2R_0} = \frac{I_{кз}}{2},$$

а коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P}{P_{ист}} = \frac{UI}{EI} = \frac{EI}{2EI} = \frac{1}{2} = 0,5 = 50\% \text{ , так как } U = \frac{E}{2}$$

К 100% КПД цепи приближается в режиме, близкой к холостому ходу.

Зависимости напряжения и полезной мощности от нагрузки (тока I) показаны на рисунке 1.12.

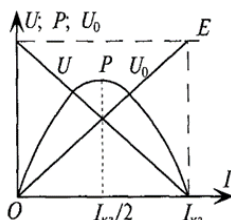


Рисунок 1.12 – Зависимость напряжения и полезной мощности от нагрузки (тока I)

Вопросы к теме 1

1. Дать определение электрическому полю. Перечислить основные характеристики электрического поля.
2. Сформулировать закон Ома для участка цепи и для замкнутой цепи.
3. Дать определение напряжению и мощности электрической цепи. Назвать их единицы измерения.
4. Охарактеризовать проводники, полупроводники и диэлектрики.
5. Дать определение электрической цепи. Перечислить основные её элементы.
6. Объяснить, как подключаются в цепь амперметр, вольтметр, омметр, ваттметр.
7. Сформулировать баланс мощностей.
8. Перечислить режимы работы электрической цепи. Охарактеризовать каждый из режимов.

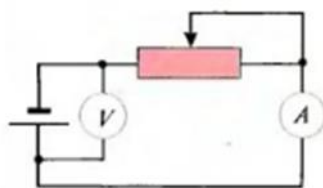
9. Сформулировать классификацию схем электрических цепей. Охарактеризовать каждую из схем.

10. В электрической цепи, схема которой показана на рисунке, включен источник постоянного тока с электродвижущей силой 2 В и внутренним сопротивлением 2 Ом, реостат с максимальным сопротивлением 8 Ом. Дать ответы на следующие вопросы:

А) Какую максимальную и минимальную силы тока может показать амперметр в этой цепи?

Б) Какое максимальное и минимальное напряжения может показать вольтметр в этой цепи?

В) Какой максимальный и минимальный коэффициенты полезного действия источника в этой цепи?



11. За 10 секунд через поперечное сечение однородного проводника ($5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$) переносится заряд 10 Кл. Длина проводника 5 м; изготовлен он из константана, удельное сопротивление которого $0,50 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Определить:

А) силу тока в проводнике;

Б) плотность тока в каждой точке проводника;

В) сопротивление проводника;

Г) электропроводимость проводника;

Д) удельную электропроводимость константана;

Е) напряжение на концах проводника и напряженность электрического поля в нем.

ТЕМА 2 РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1 Режимы работы источников. Потенциальная диаграмма.

Рассмотрим неразветвленную линейную электрическую цепь с несколькими источниками энергии (рис.2.1).

Величина тока в неразветвленной электрической цепи с несколькими источниками (рис. 2.1) определяется отношением алгебраической суммы ЭДС всех источников к полному сопротивлению цепи

$$I = \frac{\sum E}{\sum R}.$$

Для определения знаков ЭДС в алгебраической сумме условно задаются направлением обхода контура: по часовой или против часовой стрелки. ЭДС источника, направление которой совпадает с выбранным направлением обхода, учитывают со знаком «плюс», а ЭДС источника, направление которой не совпадает с выбранным направлением обхода, – со знаком «минус». Например, направление обхода выбрано по часовой стрелке (рис. 2.1), тогда

$$I = \frac{E_1 - E_2 + E_3 - E_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_{01} + R_{02} + R_{03} + R_{04}}.$$

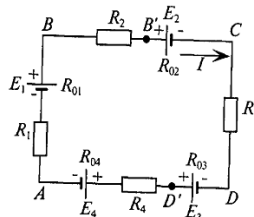


Рисунок 2.1 – Схемы электрической цепи

Если в результате расчёта величина тока получится со знаком «плюс», то его направление совпадает с выбранным направлением обхода, если же со знаком «минус», то направление тока цепи противоположно выбранному направлению обхода. Источники, ЭДС которых совпадают с направлением тока, работают в режиме генератора, а источники, ЭДС которых не совпадают с направлением тока, работают в режиме потребителя.

При изучении и расчете некоторых электрических цепей необходимо определить потенциалы отдельных точек цепи и построить потенциальную диаграмму. Для этого можно использовать выражение $U = \varphi_{(+)} - \varphi_{(-)} = E \pm IR$.

На участке АВ (рис. 2.1) точка В имеет положительный потенциал, а точка А – отрицательный потенциал, поэтому $\varphi_B - \varphi_A = \varphi_{(+)} - \varphi_{(-)} = E_1 - I(R_1 + R_{01})$, так как источник работает в режиме генератора, т. е.

$$\varphi_B = \varphi_A + E_1 - I(R_1 + R_{01})$$

На участке ВС точка В имеет положительный потенциал, а точка С – отрицательный, поэтому $\varphi_B - \varphi_C = \varphi_{(+)} - \varphi_{(-)} = E_2 - I(R_2 + R_{02})$, источник с ЭДС E_2 работает в режиме потребителя, т. е.

$$\varphi_C = \varphi_B - E_2 - I(R_2 + R_{02}).$$

Таким образом, потенциал точки D можно записать

$$\varphi_D = \varphi_A + E_1 - E_2 - I(R_1 + R_{01} + R_2 + R_{02} + R_3),$$

если обходить цепь по направлению тока, или

$$\varphi_D = \varphi_A + E_4 - E_3 - I(R_{04} + R_4 + R_{03}),$$

если обходить цепь против направления тока.

Отсюда можно сделать следующий вывод (правило): если обходить цепь или участок цепи по направлению тока, то потенциал в каждой точке определяется потенциалом предыдущей точки плюс ЭДС источника, работающего в режиме генератора, минус ЭДС источника, работающего в режиме потребителя, и минус падение напряжения на участке между точками цепи. При обходе контура против направления тока знаки ЭДС и падения напряжения изменяются на противоположные. Потенциальная диаграмма представляет собой график зависимости потенциалов точек цепи от величины сопротивлений участков между этими точками.

2.2 Ветвь, узел, контур электрической цепи. Законы Кирхгофа.

В схемах электрических цепей можно выделить характерные элементы: ветвь, узел, контур.

Ветвью электрической цепи называется ее участок, на всем протяжении которого величина тока имеет одинаковое значение.

Узлом электрической цепи (узловой точкой) называется место соединения электрических ветвей.

Контуром электрической цепи называют замкнутое соединение, которое могут входить несколько ветвей.

Ветви, содержащие источник электрической энергии, называются активными, а ветви, не содержащие источников, называются пассивными.

Первый закон Кирхгофа: в разветвленной цепи ток в различных ветвях может иметь различное значение. Сумма токов, входящих в узловую точку разветвленной цепи, должна быть равна сумме токов, выходящих из этой точки (алгебраическая сумма токов в ветвях, соединённых в один узел, равна нулю).

$$\sum I = 0.$$

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме падений напряжений на всех участках этой цепи.

$$\sum E = \sum IR.$$

2.3 Неразветвленные и разветвленные электрические цепи.

Особенности последовательного и параллельного соединения потребителей.

Электрические цепи подразделяют на неразветвленные и разветвленные. На рисунке 2.2 а представлена схема простейшей неразветвленной цепи.

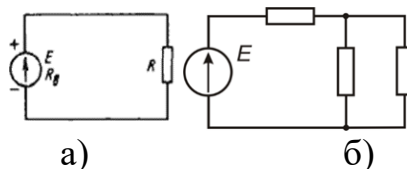


Рисунок 2.2 – Схемы простейших электрических цепей

Простейшая разветвленная цепь изображена на рисунке 2.2 б. В ней имеются три ветви и два узла. В каждой ветви течет свой ток.

Последовательным соединением участка электрической цепи называют соединение, при котором через все участки цепи проходит один и тот же ток (рис. 2.3).

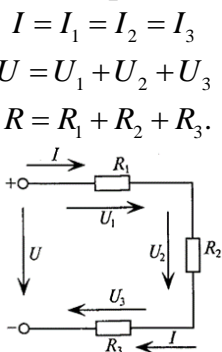


Рисунок 2.3 – Последовательное соединение потребителей

При последовательном соединении резисторов на большем сопротивлении тратится большая мощность.

$$P = UI = I^2 R$$

Параллельное соединение участков электрической цепи называют соединением, при котором все участки цепи присоединяются к одной паре узлов, т. е. находятся под действием одного и того же напряжения (рис. 2.4). Токи параллельно включенных участков обратно пропорциональны сопротивлениям этих участков.

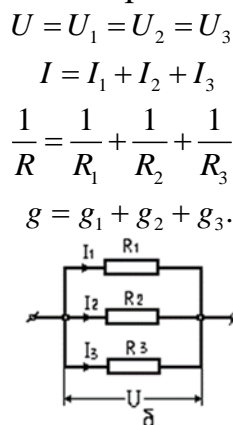


Рисунок 2.4 – Параллельное соединение потребителей

Если параллельно включены n одинаковых потребителей с сопротивлением R' каждый, то эквивалентное сопротивление этих потребителей $R = \frac{R'}{n}$.

При параллельном соединении потребителей на большем сопротивлении тратится меньшая мощность:

$$P = UI = \frac{U^2}{R}.$$

2.4 Методы расчета электрических цепей. Метод эквивалентных преобразований электрической цепи

Цепь со смешанным соединением включает в себя участки с последовательным и параллельным соединением потребителей, или сопротивлением (резисторов).

Расчет электрической цепи с одним источником и смешанным соединением резисторов методом свёртывания проводится в следующей последовательности.

1. На схеме отмечаются все узловые точки и расставляются направления токов в ветвях.

2. Группы резисторов с явно выраженным последовательным или параллельным соединением заменяются эквивалентными, и определяются их сопротивления, используя особенности последовательного и параллельного соединения.

3. Замена производится до получения простейшей схемы для которой элементарно определяется общее (эквивалентное) сопротивление всей цепи.

4. По заданному напряжению источника и вычислительному общему сопротивлению всей цепи определяется ток в неразветвлённой части цепи (общий ток) по закону Ома.

5. Определяются падения напряжения на участках цепи и ток каждого резистора.

2.5 Звезда и треугольник сопротивлений

Контур, состоящий из трёх сопротивлений R_{AB} , R_{BC} и R_{CA} , имеющий три узловые точки А, В и С, образует треугольник сопротивлений (рис. 2.5 а).

Электрическая цепь, состоящая из трёх сопротивлений R_A , R_B и R_C , соединённых в одной узловой точке О, образует звезду сопротивлений (рис. 2.5 б).

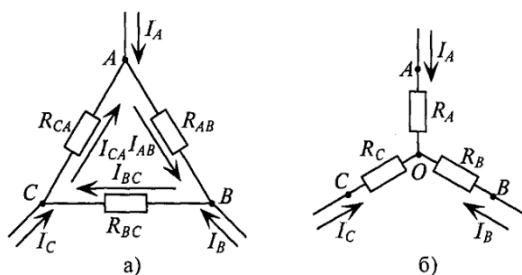


Рисунок 2.5 – Треугольник сопротивлений (а), звезда сопротивлений (б)

Расчет некоторых сложных цепей значительно упрощается, если соединение звездой в них заменить соединением треугольником или наоборот.

При замене треугольника эквивалентной звездой сопротивления звезды определяются следующими выражениями:

$$R_A = \frac{R_{AB}R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}};$$

$$R_B = \frac{R_{BC}R_{AB}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}};$$

$$R_C = \frac{R_{CA}R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}.$$

При замене звезды эквивалентным треугольником каждое сопротивление треугольника определяется следующими выражениями:

$$R_{AB} = R_A + R_B + \frac{R_A R_B}{R_C};$$

$$R_{BC} = R_B + R_C + \frac{R_B R_C}{R_A};$$

$$R_{CA} = R_C + R_A + \frac{R_C R_A}{R_B}.$$

2.6 Метод наложения токов

Метод наложения токов является одним из методов расчета сложных цепей с несколькими источниками.

Сущность метода в следующем:

- 1 В каждой ветви произвольно выбирается направление действительных токов;
- 2 Составляются частные схемы (схемы содержат только одну ЭДС, остальные принимаются равными нулю);
- 3 В каждой частной схеме выбирается направление частных токов;
- 4 Используя метод свёртывания, решают частные схемы, т.е. находят частные токи;
- 5 Действительные токи находятся как алгебраическая сумма частных токов.

2.7 Метод узлового напряжения

Данный метод применим к цепи с двумя узлами. Если в схеме узлов больше двух, то её необходимо преобразовать к двум узлам.

Алгоритм решения:

- 1 Выбрать направление действительных токов в исходной схеме.
- 2 Преобразовать схему к двум узлам.
- 3 Выбрать направление токов в ветвях (желательно токи в ветвях направлять от одного узла к другому).
- 4 Рассчитать проводимость каждой ветви по формуле:

$$g = \frac{1}{R}$$

- 5 Определить узловое напряжение:

$$U_{AB} = \frac{\sum E \cdot g}{\sum g}$$

- 6 Определить токи в ветвях:

$$I = (E - U_{AB}) \cdot g$$

- 7 Определить действительные токи.

2.8 Метод узловых и контурных уравнений

Метод узловых и контурных уравнений для расчёта сложных электрических цепей подразумевает составление системы уравнений по законам Кирхгофа. При составлении системы уравнений должно учитываться следующее.

1. Число уравнений равно числу токов в цепи (число токов равно числу ветвей в рассчитываемой цепи). Направление токов в ветвях выбирается произвольно.
2. По первому закону Кирхгофа составляется $(n - 1)$ уравнений, где n – число узловых точек в схеме.
3. Остальные уравнения составляются по второму закону Кирхгофа.

В результате решения системы уравнений определяются искомые величины для сложной электрической цепи (например, все токи при заданных значениях ЭДС источников E и сопротивлений резисторов). Если в результате расчёта какие-либо то-

ки получаются отрицательными, это указывает на то, что их направление противоположно выбранному.

Составим необходимое и достаточное количество уравнений по законам Кирхгофа или определения всех токов в цепи (рис. 2.6) методом узловых и контурных уравнений.

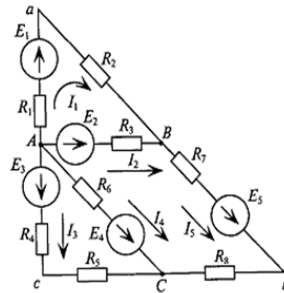


Рисунок 2.6 – Схема электрической цепи

В рассматриваемой сложной цепи имеется 5 ветвей, следовательно, 5 различных токов, поэтому для расчёта необходимо составить 5 уравнений, причем 2 уравнения – по первому закон Кирхгофа (в цепи $n=3$ узловых точки A, B и C) и 3 уравнения по второму закону Кирхгофа (внутренним сопротивлением источников пренебрегаем, т. е. $R_0=0$).

Составляем уравнения:

$$1. I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0 \text{ (для точки A);}$$

$$2. I_1 + I_2 - I_5 = 0 \text{ (для точки B);}$$

$$3. E_1 - E_2 = I_1(R_1 + R_2) - I_2 R_3 \text{ (для контура AaB);}$$

$$4. E_2 + E_5 - E_4 = I_2 R_3 + I_5(R_7 + R_8) - I_4 R_6 \text{ (для контура ABbC);}$$

$$5. E_4 - E_3 = I_4 R_6 - I_1(R_4 + R_5) \text{ (для контура ACc).}$$

Обход по часовой стрелке.

2.9 Метод контурных токов

При расчете сложных цепей методом узловых и контурных уравнений (по законам Кирхгофа) необходимо решать систему из большого количества уравнений, что значительно затрудняет вычисления.

Так, для схемы (рис. 2.7) необходимо составить и рассчитать систему из 7-ми уравнений.

Ту же задачу можно решить, записав только 4 уравнения по второму закону Кирхгофа, если воспользоваться методом контурных токов.

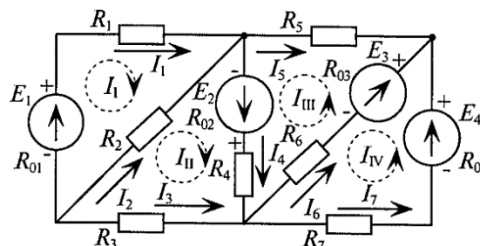


Рисунок 2.7 – Схема электрической цепи

Суть метода состоит в том, что в схеме выделяют m независимых контуров, в каждом из которых произвольно направлены (см. пунктирные стрелки) контурные

токи $I_I, I_{II}, I_{III}, I_{IV}$. Контурный ток – это расчетная величина, измерить которую невозможно.

Как видно из рисунка 2.7, отдельные ветви схемы входят в два смежных контура. Действительный ток в такой ветви определяется алгебраической суммой контурных токов смежных контуров. Таким образом

$$I_1 = I_I; I_2 = I_{II} - I_I; I_3 = -I_{II}; I_4 = I_{II} + I_{III};$$

$$I_5 = -I_{III}; I_6 = I_{III} - I_{IV}; I_7 = I_{IV}.$$

Для определения контурных токов составляют m уравнений по второму закону Кирхгофа. В каждое уравнение входит алгебраическая сумма ЭДС, включенных в данный контур (по одну сторону от знака равенства), и общее падение напряжения в данном контуре, созданное контурным током данного контура и контурными токами смежных контуров (по другую сторону знака равенства).

Для данной схемы (рис. 2.7) необходимо составить 4 уравнения. Со знаком «плюс» записываются ЭДС и падения напряжения (по разные стороны знака равенства), действующие в направлении контурного тока, со знаком «минус» – направленные против контурного тока.

Система уравнений для схемы (рис. 2.7):

$$E_1 = I_I (R_{01} + R_1 + R_2) - I_{II} R_2,$$

$$E_2 = I_{II} (R_{02} + R_4 + R_3 + R_2) - I_I R_2 + I_{III} (R_{02} + R_4),$$

$$E_2 + E_3 = I_{III} (R_{02} + R_4 + R_6 + R_{03} + R_5) + I_{II} (R_{02} + R_4) - I_{IV} (R_{03} + R_6),$$

$$E_4 - E_3 = I_{IV} (R_{04} + R_{03} + R_6 + R_7) - I_{III} (R_{03} + R_6).$$

Решением системы уравнений вычисляются значения контурных токов, которые и определяют действительные токи схемы.

2.10 Активный и пассивный двухполюсники.

Метод эквивалентного генератора

В любой электрической схеме можно мысленно выделить какую-то одну ветвь, а всю остальную часть схемы независимо от ее структуры и сложности условно изобразить некоторым прямоугольником (рис. 2.8 а). По отношению к выделенной ветви вся схема, обозначенная прямоугольником, представляет собой так называемый двухполюсник.

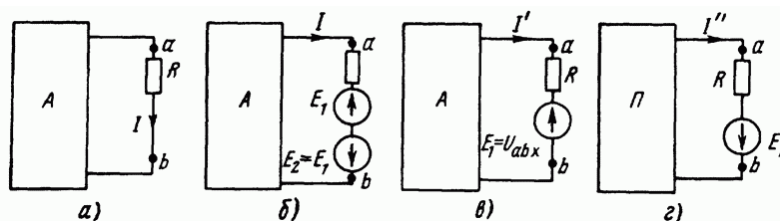


Рисунок 2.8 – Двухполюсник

Таким образом, двухполюсник – это обобщенное название схемы, которая двумя выходными зажимами (полюсами) присоединена к выделенной ветви.

Если в двухполюснике есть источник ЭДС и (или) тока, то такой двухполюсник называют активным. В этом случае в прямоугольнике ставят букву А (рис. 2.8 а-в).

Если в двухполюснике нет источника ЭДС и (или) тока, то его называют пассивным. В этом случае в прямоугольнике либо не ставят никакой буквы, либо ставят букву П (рис. 2.8 г).

Метод эквивалентного генератора рационально применять в случае необходимости определения тока (напряжения, мощности и др.) только одной ветви сложной электрической цепи.

Для этой цели разбивают сложную электрическую цепь на две части – на сопротивление R , ток которого I нужно определить, и всю остальную цепь, её называют активным двухполюсником, так как эта часть имеет две клеммы А и В, к которой и подключается сопротивление R (рис. 2.9).

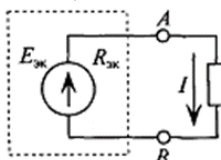


Рисунок 2.9 – Схема активного двухполюсника

Ток в резисторе с сопротивлением R определяют по закону Ома

$$I = \frac{E_{\text{экв}}}{R_{\text{экв}} + R}.$$

Величина ЭДС $E_{\text{экв}}$ определяется любым методом расчёта цепей постоянного тока относительно точек А и В при разомкнутых клеммах, т. е. в режиме холостого хода.

Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора $R_{\text{экв}}$ вычисляется относительно точек А и В после предварительной смены всех источников сложной схемы эквивалентного генератора их внутренними сопротивлениями. Практически для определения внутреннего сопротивления эквивалентного генератора измеряют амперметром ток между точками А и В работающего двухполюсника при коротком замыкании, так как сопротивление амперметра настолько мало, что им можно пренебречь. Тогда

$$R_{\text{экв}} \approx \frac{U_{\text{ХХ}}}{I_{\text{КЗ}}}$$

где $U_{\text{ХХ}}$ – напряжение холостого хода, $I_{\text{КЗ}}$ – ток короткого замыкания.

Вопросы к теме 2

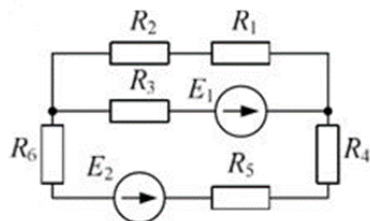
1. Сформулировать первый и второй законы Кирхгофа.
2. Дать определение неразветвленной и разветвленной электрической цепи.
3. Перечислить свойства последовательного и параллельного соединения пассивных элементов.
4. Дать определение потенциальной диаграмме и рассказать порядок её построения.
5. Рассказать порядок расчёта цепей методом свертывания, дать определение «треугольнику» и «звезде» электрических сопротивлений в электрической цепи. Записать формулы их преобразования.
6. Рассказать порядок расчёта электрических цепей методом контурных токов.

7. Рассказать порядок расчёта электрических цепей методом узловых и контурных уравнений.

8. Рассказать порядок расчёта электрических цепей методом наложения.

9. Рассказать порядок расчёта электрических цепей методом узлового напряжения.

10. Рассчитать токи во всех ветвях схемы электрической цепи, представленной на рисунке, используя следующие методы: метод контурных токов, метод узловых и контурных уравнений, метод наложения токов, метод узлового напряжения. Данные для схемы: $E_1 = 30$ В, $E_2 = 50$ В, $R_1 = 6$ Ом, $R_2 = 15$ Ом, $R_3 = 19$ Ом, $R_4 = 12$ Ом, $R_5 = 24$ Ом, $R_6 = 20$ Ом. Внутренним сопротивлением источников пренебречь.



ТЕМА 3 НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1 Общая характеристика нелинейных элементов электрической цепи постоянного тока

Нелинейными называются цепи, в которые включены нелинейные элементы (НЭ).

Элемент электрической цепи, сопротивление которого зависит от величины и направления тока в нём или от напряжения на его зажимах, называется нелинейным. Нелинейными такие элементы называют потому, что их вольт-амперная характеристика (т. е. зависимость тока от напряжения, приложенного к элементу) – нелинейная. Виды нелинейной зависимости показаны на рисунке 3.1 а.

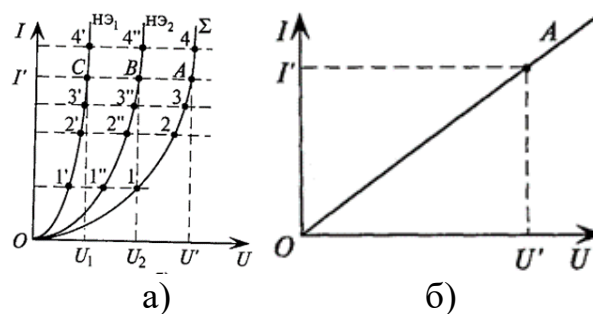


Рисунок 3.1 – Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов (а), вольт-амперная характеристика линейного элемента (б)

Примерами нелинейных элементов могут служить электронные и газонаполненные лампы, полупроводниковые приборы, лампы накаливания и пр.

Для расчета нелинейных цепей рационально использовать графоаналитический метод, который предусматривает построение суммарной вольт-амперной характеристики цепи. По суммарной характеристике и характеристикам элементов определяются искомые величины (обычно токи и напряжения).

Нелинейные элементы характеризуются двумя параметрами: статическим R_{cm} и дифференциальным R_{diff} сопротивлениями.

Статическим сопротивлением называется отношение напряжения к току в данной точке (рис. 3.2)

$$R_{cm} = \frac{U}{I} = \frac{m_u}{m_I} \operatorname{tg} \alpha ,$$

где m_u, m_I – масштаб по напряжению и току.

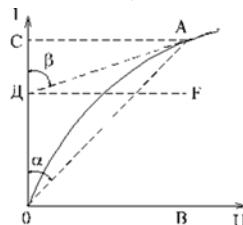


Рисунок 3.2 – Вольт-амперная характеристика нелинейного элемента

Дифференциальное сопротивление определяется производной к ВАХ в точке А, т.е. тангенсом угла наклона касательной в точке А.

$$R_{diff} = \frac{dU}{dI} = \frac{m_u}{m_I} \operatorname{tg} \beta$$

3.2 Нелинейные электрические цепи

В неразветвлённой нелинейной электрической цепи все элементы соединены последовательно и по всем элементам проходит одинаковый ток (рис. 3.3 а).

Для расчёта цепи с последовательно соединёнными нелинейными элементами $нЭ_1$ и $нЭ_2$ по заданным вольт-амперным характеристикам этих элементов строится суммарная вольт-амперная характеристика нелинейной цепи (рис. 3.3 б). При последовательном соединении элементов для построения суммарной вольт-амперной характеристики суммируются абсциссы (напряжения) вольт-амперных характеристик элементов при различных токах, например, в точках 1, 2, 3, 4 (рис. 3.3 б).

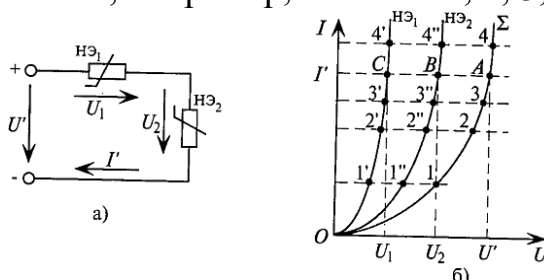


Рисунок 3.3 – Неразветвлённая нелинейная электрическая цепь (а), вольт-амперные характеристики (б)

При параллельном соединении нелинейных элементов напряжение на всех элементах будет одинаковым. Для расчёта цепи с параллельным соединением нелинейных элементов $нЭ_1$ и $нЭ_2$ (рис. 3.4 а) строится суммарная вольт-амперная характеристика цепи по заданным вольт-амперным характеристикам нелинейных элементов, при этом суммируются ординаты (токи), соответствующие различным значениям напряжений (точки 1, 2, 3, 4 на рис. 3.4 б).

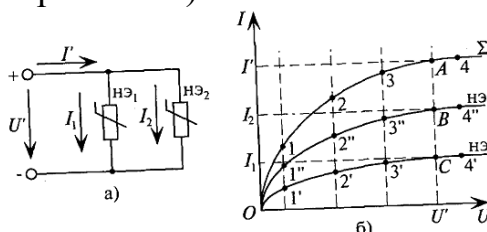


Рисунок 3.4 – Разветвлённая нелинейная электрическая цепь (а), вольт-амперные характеристики (б)

Включение в нелинейную цепь линейного элемента не меняет характера и порядка расчёта.

Вопросы к теме 3

1. Дать определение нелинейному элементу. Назвать отличие нелинейных и линейных элементов.
2. Привести примеры нелинейных элементов.
3. Дать определение вольт-амперной характеристике (ВАХ) нелинейного элемента. Назвать какую ВАХ имеют нелинейные элементы.
4. Назвать методы расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока.
5. Рассказать порядок расчёта нелинейных электрических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединении элементов.

ТЕМА 4 ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ПУСТОТЕ

4.1 Закон Кулона

Закон взаимодействия электрических зарядов экспериментально установлен в 1785 г. французским ученым Ш. Кулоном. Природа вещей такова, что сила взаимодействия между двумя небольшими заряженными шариками прямо пропорциональна произведению величин их зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Закон Кулона – это закон, описывающий силы взаимодействия между неподвижными точечными электрическими зарядами:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi r^2 \epsilon \epsilon_0},$$

где k – коэффициент пропорциональности; q_1 и q_2 – величины взаимодействующих зарядов; r – расстояние между ними; \mathbf{r} – радиус-вектор, проведенный от одного заряда к другому и направленный к тому из зарядов, на который действует сила.

Экспериментальные исследования показали, что при прочих равных условиях сила электростатического взаимодействия зависит от свойств среды, в которой находятся заряды.

4.2 Теорема Гаусса

Теорема Гаусса (закон Гаусса) – один из основных законов электродинамики, входит в систему уравнений Максвелла. Выражает связь (а именно равенство с точностью до постоянного коэффициента) между потоком напряженности электрического поля сквозь замкнутую поверхность и зарядом в объеме, ограниченном этой поверхностью.

Введем новую физическую величину, характеризующую электрическое поле – поток Φ вектора напряженности электрического поля. Пусть в пространстве, где создано электрическое поле, расположена некоторая достаточно малая площадку ΔS . Произведение модуля вектора \vec{E} на площадь ΔS и на косинус угла α между вектором \vec{E} и нормалью \vec{n} к площадке называется элементарным потоком вектора напряженности через площадку ΔS (рис. 4.1):

$$\Delta\Phi = E \Delta S \cos \alpha = E_n \Delta S,$$

где E_n – модуль нормальной составляющей поля \vec{E} .

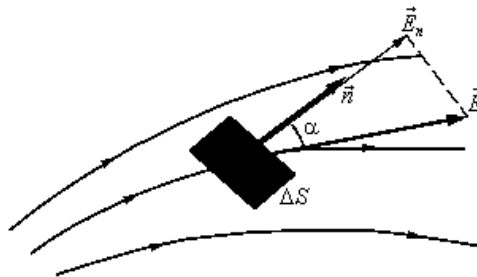


Рисунок 4.1 – К определению элементарного потока $\Delta\Phi$

Рассмотрим теперь некоторую произвольную замкнутую поверхность S . Если разбить эту поверхность на малые площадки ΔS_i , определить элементарные потоки

$\Delta\Phi_i$ поля \vec{E} через эти малые площадки, а затем их просуммировать, то в результате мы получим поток Φ вектора \vec{E} через замкнутую поверхность S (рис. 4.2):

$$\Phi = \sum \Delta\Phi_i = \sum E_{ni} \Delta S_i$$

В случае замкнутой поверхности всегда выбирается внешняя нормаль.

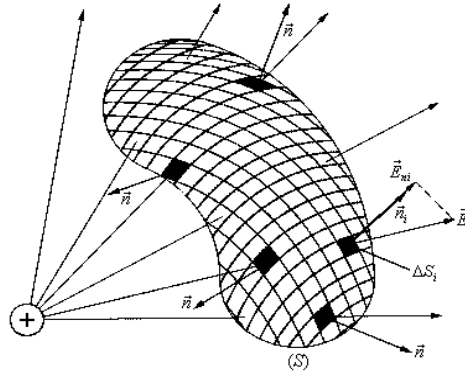


Рисунок 4.2 – Вычисление потока Φ через произвольную замкнутую поверхность S

Теорема Гаусса утверждает: поток вектора напряженности электростатического поля \vec{E} через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, расположенных внутри этой поверхности, деленной на электрическую постоянную ϵ_0 .

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_{\text{внутр}}$$

Теорема Гаусса является следствием закона Кулона и принципа суперпозиции.

Вопросы к теме 4

1. Дать определение точечному заряду. Записать формулу определения силы взаимодействия двух точечных зарядов.
2. Назвать от чего зависит напряженность поля и каким выражением она определяется.
3. Сформулировать теорему Гаусса.
4. Сформулировать закон Кулона.
5. Найти плотность электрического заряда в атмосфере, если на поверхности Земли напряженность электрического поля равна $E_1 = 100$ В/м, а на высоте $h=1,5$ км – $E_2 = 25$ В/м. Считать, что плотность заряда постоянна (-4.43×10^{-13} Кл/м³), а вектор напряженности направлен вертикально вверх.

ТЕМА 5 ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ДИЭЛЕКТРИКЕ. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

5.1 Диэлектрик. Электрический момент диполя. Поляризация диэлектрика

Диэлектрик (изолятор) – вещество, практически не проводящее электрический ток. Основное свойство диэлектрика состоит в способности поляризоваться во внешнем электрическом поле. Физическим параметром, который характеризует диэлектрик, является диэлектрическая проницаемость.

К диэлектрикам относятся воздух и другие газы, стёкла, различные смолы, пластмассы, многие виды резины.

Электрический дипольный момент – векторная физическая величина, характеризующая, наряду с суммарным зарядом (и реже используемыми высшими мультипольными моментами), электрические свойства системы заряженных частиц (распределения зарядов) в смысле создаваемого ею поля и действия на нее внешних полей.

Электрический дипольный момент нейтральной системы зарядов не зависит от выбора начала координат, а определяется относительным расположением (и величинами) зарядов в системе.

Поляризация диэлектриков происходит вследствие смещения электрических зарядов в диэлектрике атомов, молекул, ионов под действием приложенного напряжения. С поляризацией диэлектрика связана одна из важнейших характеристик – диэлектрическая проницаемость вещества μ .

Диэлектрическая проницаемость показывает во сколько раз электрическое поле в диэлектрике меньше электрического поля в вакууме и дает возможность судить об интенсивности процессов поляризации и качестве диэлектрика.

Диэлектрик, помещенный во внешнее электрическое поле, поляризуется под действием этого поля. Поляризацией диэлектрика называется процесс приобретения им отличного от нуля макроскопического дипольного момента.

5.2 Электрическая емкость. Конденсаторы

Электрическая ёмкость – характеристика проводника, мера его способности накапливать электрический заряд. Электрическая емкость проводника равна:

$$C = \frac{Q}{\varphi}.$$

Электрическая емкость проводника характеризуется зарядом Q , который необходимо сообщить проводнику, чтобы его потенциал изменился на единицу.

Единицей измерения емкости является фарад.

$$[C] = \left[\frac{Q}{\varphi} \right] = \frac{Кл}{В} = 1Ф(фарад).$$

Ёмкость проводника зависит от:

- 1) площади поверхности проводника, так как заряды располагаются на поверхности проводника;
- 2) среды, в которой находится проводник;
- 3) близости других проводников.

Конденсатор представляет собой два проводника, разделенных диэлектриком. Ёмкость конденсатора характеризуется зарядом, который нужно сообщить одному из проводников конденсатора для того, чтобы разность потенциалов между проводниками конденсатора (напряжения) изменилась на единицу.

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U}.$$

Различают естественные и искусственные конденсаторы.

Естественными конденсаторами являются провода электрической сети, два жила кабеля, жила кабеля и его броня, провода воздушной линии электропередачи относительно земли, электроды электронной лампы и др. Естественные конденсаторы специально не создаются.

Искусственные конденсаторы изготавливают специально. В зависимости от диэлектрика различают воздушные, бумажные, керамические, слюдяные, электролитические и другие виды конденсаторов.

Конденсаторы могут служить для накопления и сохранения электрического поля и его энергии (так как проводимость диэлектриков конденсаторов ничтожно мала).

5.3 Параллельное и последовательное соединение конденсаторов

При параллельном соединении конденсаторов к каждому конденсатору приложено одинаковое напряжение U , а величина заряда на обкладках каждого конденсатора Q пропорциональна его ёмкости (рис. 5.1).

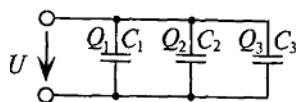


Рисунок 5.1 – Параллельное соединение конденсаторов

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = U/(C_1 + C_2 + C_3)$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = C.$$

Общая ёмкость C , или ёмкость батареи, параллельно включенных конденсаторов равна сумме ёмкостей этих конденсаторов.

Если параллельно включены m одинаковых конденсаторов ёмкостью C' каждый, то общая (эквивалентная) ёмкость батареи этих конденсаторов может быть определена выражением

$$C = C'm.$$

Следовательно, параллельное соединение конденсаторов применяется для увеличения емкости.

Последовательное соединение конденсаторов представлено на рисунке 5.2.

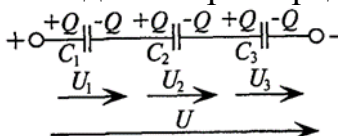


Рисунок 5.2 – Последовательно соединение конденсаторов

На обкладках последовательно соединенных конденсаторов, подключенных к источнику постоянного тока с напряжением U , появятся заряды одинаковые по ве-

личине с противоположными знаками. Напряжение на конденсаторах распределяется обратно пропорционально ёмкостям конденсаторов:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$
$$\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{C}$$

Если в цепь включены последовательно n одинаковых конденсаторов ёмкостью C' каждый, то общая ёмкость этих конденсаторов:

$$C = \frac{C'}{n}$$

Чем больше конденсаторов n соединено последовательно, тем меньше будет их общая ёмкость C , т. е. последовательное включение конденсаторов приводит к уменьшению общей ёмкости батареи конденсаторов.

5.4 Ёмкость и энергия конденсаторов

Из искусственных конденсаторов большое распространение получили плоские конденсаторы. Плоским называют конденсатор, у которого обкладки представляют собой параллельно расположенные пластины, разделённые диэлектриком.

Ёмкость плоского конденсатора определяется:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d},$$

где S – площадь пластины плоского конденсатора; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора; d – расстояние между пластинами конденсатора.

Ёмкость плоского конденсатора пропорционально площади пластины конденсатора, абсолютной и диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсатора и обратно пропорционально расстоянию между пластинами конденсатора (толщине диэлектрика).

Если к конденсатору или к электростатической цепи приложено напряжение U , то в электрической цепи этих конденсаторов создаётся электрическое поле, в котором накапливается энергия

$$W_{эл} = \frac{QU}{2} = \frac{CU^2}{2},$$

где Q – заряд конденсатора или конденсаторов, к которым приложено напряжение U ; C – электрическая ёмкость конденсатора цепи батареи соединены конденсаторов, к которой приложено напряжение U .

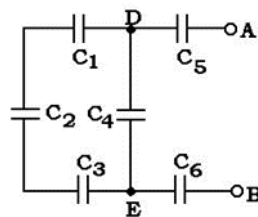
Вопросы к теме 5

1. Дать определение электрическому диполю. Рассказать, что происходит с диэлектриком, если его поместить в электростатическом поле.

2. Дать определение пробоем диэлектрика. Назвать условия, при которых может произойти пробой. Охарактеризовать процесс пробоя.

3. Дать определение напряжению пробоя, напряжённости пробоя.

4. Дать определение ёмкости. Назвать параметры, от которых она зависит, и единицу измерения емкости.
5. Дать определение конденсатору. Назвать, чем характеризуется его ёмкость.
6. Перечислить свойства последовательного и параллельного соединения конденсаторов.
7. Рассказать о применении смешанного соединения конденсаторов.
8. Дать определение плоскому и цилиндрическому конденсаторам. Написать выражение для определения их ёмкости.
9. Назвать способы увеличения емкости конденсатора и рабочего напряжения.
10. Написать выражение для определения энергии конденсатора.
11. Найти емкость батареи и энергию электрического поля конденсаторов, соединенных по схеме, приведенной на рисунке. Все конденсаторы имеют одинаковую емкость $C = 4$ мкФ. Напряжение U , приложенное к цепи, равно 100 В.



ТЕМА 6 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В НЕФЕРРОМАГНИТНОЙ СРЕДЕ

6.1 Основные понятия магнитного поля. Электромагнитная сила

Магнитное поле создаётся электрическими токами. Следовательно, магнитное поле и электрический ток неразрывно связаны. Магнитное поле не может существовать без электрического тока.

Основной силовой характеристикой магнитного поля является магнитная индукция. Магнитная индукция B – физическая величина, характеризующая направление действия магнитной силы и ее значение в данной точке поля. Единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл). Значение магнитной индукции определяется по формуле

$$B = \mu_a \mu_0 \frac{I}{2\pi r},$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость; μ_0 – магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – абсолютная магнитная проницаемость вакуума); r – расстояние от проводника до рассматриваемой точки магнитного поля.

Абсолютная магнитная проницаемость – физическая величина, характеризующая магнитные свойства среды.

Отношение магнитной проницаемости какого-либо вещества к магнитной постоянной называется относительной магнитной проницаемостью:

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}$$

Магнитное поле изображают линиями магнитной индукции – кривыми, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции \vec{B} .

Например, линии индукции поля прямого тока представляют систему охватывающих проводник концентрических окружностей. Знак «плюс» и точка обозначают направление тока в проводнике: ток течет «от нас» (рис. 6.1 а) или «к нам» (рис. 6.1 б).

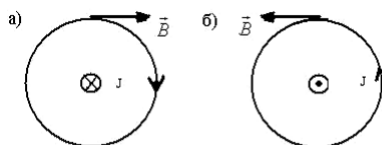


Рисунок 6.1 – Линии индукции прямого тока

Направление магнитных силовых линий, создаваемых токов, а следовательно, и направление вектора \vec{B} определяют с помощью правила буравчика (рис. 6.2).

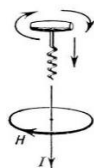


Рисунок 6.2 – Правило буравчика

Если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление линий магнитной индукции совпадает с направлением вращательного движения его рукоятки.

Магнитный поток Φ – это поток вектора магнитной индукции, проходящий через какую-либо поверхность.

$$\Phi = BS$$

Единицей измерения магнитного потока является вебер (Вб).

Если вектор магнитной индукции не перпендикулярен пересекаемой поверхности, то

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

где α – угол между направлением вектора магнитной индукции и плоскостью пересекаемой поверхности.

На проводник с током в магнитном поле действует электромагнитная сила, которую называют силой Ампера

$$F = BIl \sin \alpha,$$

где α – угол между направлением тока I и вектора магнитной индукции; l – длина проводника.

Направление этой силы определяется по правилу левой руки (рис. 6.3): если ладонь левой руки расположить так, чтобы линии вектора магнитной индукции входят в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока, то большой палец, отогнутый на 90° , укажет направление силы Ампера.

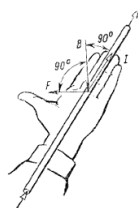


Рисунок 6.3 – Правило левой руки

6.2 Закон Био-Савара и его применения для расчёта магнитного поля в простейших случаях (ток в кольцевом и прямоугольном проводниках)

Магнитное поле постоянных токов различной конфигурации изучалось экспериментально французскими учеными Ж. Био и Ф. Саваром (1820 г.). Они пришли к выводу, что индукция магнитного поля токов, текущих по проводнику, определяется совместным действием всех отдельных участков проводника. Магнитное поле подчиняется принципу суперпозиции: если магнитное поле создается несколькими проводниками с током, то индукция результирующего поля есть векторная сумма индукций полей, создаваемых каждым проводником в отдельности.

Закон Био–Савара определяет вклад $\Delta \vec{B}$ в магнитную индукцию \vec{B} результирующего магнитного поля, создаваемый малым участком Δl проводника с током I .

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

Здесь r – расстояние от данного участка Δl до точки наблюдения, α – угол между направлением на точку наблюдения и направлением тока на данном участке, μ_0 – магнитная постоянная. Направление вектора $\Delta \vec{B}$ определяется правилом буравчика: оно совпадает с направлением вращения рукоятки буравчика при его поступательном перемещении вдоль тока. Рисунок 6.4 иллюстрирует закон Био–Савара на примере магнитного поля прямолинейного проводника с током. Если просуммировать (проинтегрировать) вклады в магнитное поле всех отдельных участков

прямолинейного проводника с током, то получится формула для магнитной индукции поля прямого тока:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}.$$

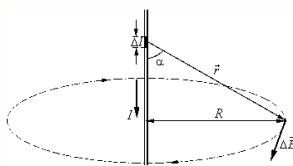


Рисунок 6.4 – Иллюстрация закона Био–Савара

Закон Био–Савара позволяет рассчитывать магнитные поля токов различных конфигураций. Нетрудно, например, выполнить расчет магнитного поля в центре кругового витка с током. Этот расчет приводит к формуле

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 R},$$

где R – радиус кругового проводника. Для определения направления вектора \vec{B} также можно использовать правило буравчика, только теперь его рукоятку нужно вращать в направлении кругового тока, а поступательное перемещение буравчика укажет направление вектора магнитной индукции.

6.3 Напряженность магнитного поля

Напряжённость в каждой точке магнитного поля – это расчётная величина, характеризующая интенсивность магнитного поля в данной точке, созданного током, без учёта среды, в которой создаётся поле.

Обозначается напряжённость магнитного поля буквой H .

Соотношение между B и H в какой-либо точке магнитного поля выглядит следующим образом:

$$B = \mu_a H = \mu_0 \mu_r H$$

Единица измерения напряженности в любой точке магнитного поля: $[H] = 1 \frac{A}{m}$.

Напряженность – величина векторная, причём направление вектора напряжённости в каждой точке совпадает с направлением магнитного поля в этой точке (касательная к магнитной линии в этой точке).

Если магнитное поле создано несколькими токами, то напряженность в каждой точке этого поля определяется геометрической суммой напряженностей, созданных каждым током в этой точке:

$$\vec{H}_A = \vec{H}_{A1} + \vec{H}_{A2} + \dots + \vec{H}_{Ak}.$$

6.4 Закон полного тока

Допустим, что в точке A вектор напряжённости H составляет угол α с элементом длины dl замкнутого контура, ограничивающего поверхность, пронизываемую токами I_1 , I_2 и I_3 (рис. 6.5).

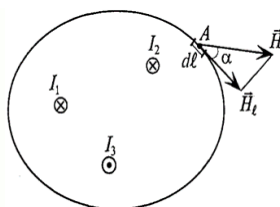


Рисунок 6.5 – Напряженность магнитного поля, созданного несколькими токами
 Алгебраическая сумма токов, пронизывающих площадь, ограниченную замкнутым контуром (рис. 6.5), называется полным током сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.

$$\sum I = I_1 + I_2 - I_3$$

Это и есть математическое выражение полного тока для площади, ограниченной контуром.

Вопросы к теме 6

1. Дать определение магнитному полю.
2. Дать определение магнитной индукции. Записать выражение для определения элементарной магнитной индукции.
3. Дать определение однородному магнитному полю
4. Назвать, в каких единицах выражается магнитная индукция.
4. Дать определение абсолютной магнитной проницаемости. Назвать единицу измерения.
5. Сформулировать классификацию веществ в зависимости от магнитной проницаемости. Привести примеры.
6. Дать определение магнитному потоку. Назвать единицу измерения.
7. Рассказать, как определить элементарный магнитный поток через элементарную площадку и через всю поверхность площадью S . Назвать, чему равен магнитный поток сквозь замкнутую поверхность.
8. Дать определение напряженности магнитного поля.

ТЕМА 7 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ФЕРРОМАГНИТНОЙ СРЕДЕ. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

7.1 Намагничивание ферромагнитных материалов. Магнитный гистерезис

Так как ферромагнитный материал является основной магнитных цепей, то для исследования и расчёта магнитных цепей необходимо изучить свойства и характеристики ферромагнитных материалов. Если по катушке с числом витков W , расположенной на замкнутом магнитопроводе длиной l , проходит ток I (рис. 7.1), то в катушке создаётся магнитное поле, напряжённость которого:

$$H = \frac{IW}{l}.$$

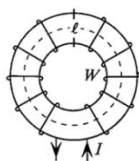


Рисунок 7.1 – Катушка с числом витков W

Магнитная индукция B в магнитопроводе катушки складывается из двух компонентов – магнитной индукции внешнего поля, созданной МДС катушки B_0 , и добавочной индукции B_d , созданной намагничённым магнитопроводом из ферромагнитного материала, т. е.

$$B = B_0 + B_d = \mu_0 H + \mu_0 M.$$

Зависимость магнитных индукций B_0 , B_d , и B от изменения напряжённости H представлена на рисунке 7.2.

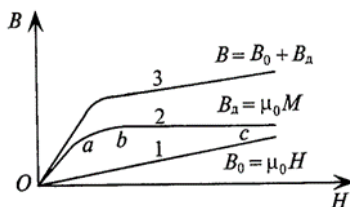


Рисунок 7.2 – Зависимость магнитных индукций B_0 , B_d , и B от изменения напряжённости H

Суммарная кривая 3 зависимости индукции ферромагнитного материала от напряжённости магнитного поля $B=f(H)$ называется кривой намагничивания данного ферромагнитного материала.

Изменение тока в катушке (рис. 7.2) и соответственно напряжённости H магнитного поля в ней не только по величине, но и по направлению, приводит к изменению индукции в ферромагнитном сердечнике катушки по величине и направлению.

Зависимость магнитной индукции B в сердечнике от напряжённости H при изменении тока I катушки по величине и направлению можно проследить по кривой (рис. 7.3). Увеличение тока приводит к увеличению напряжённости H и индукции B в ферромагнитном материале до насыщения по кривой 0-1 (рис. 7.3). Если уменьшить ток до нуля, то и напряжённость H уменьшается до нуля, а индукция при этом уменьшается от величины B_m (насыщение) до значения 0-2 по кривой 1-2. Значение индукции 0-2, оставшейся в сердечнике катушки при уменьшении напряжённости до нуля называется остаточной индукцией B_r в данном ферромагнитном материале.

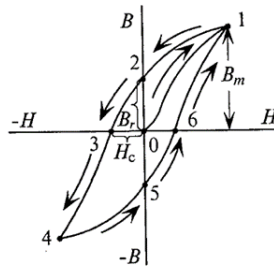


Рисунок 7.3 – Зависимость магнитной индукции B в сердечнике от напряжённости H (петля гистерезиса)

Если изменить направление тока в катушке, а, следовательно, и направление напряжённости в сердечнике и увеличивать эту напряженность (в обратном направлении), то можно добиться уменьшения индукции до нуля (кривая 2-3), т. е. сердечник полностью размагничивается. Напряжённость 0-3, которая потребовалось для того, чтобы размагнитить ферромагнитный материал, и полностью дезориентировать домены, задерживающей, или коэрцитивной, силой H_C . Если продолжить увеличение напряжённости, то индукция изменит своё направление и её значение будет увеличиваться в новом направлении от нуля до насыщения по кривой 3-4.

Если уменьшать напряженность до нулевого значения, то индукция уменьшится по кривой 4-5, где отрезок 0-5 – остаточная индукция B_r в обратном направлении. Чтобы размагнитить сердечник необходимо снова изменить направление тока и напряжённости (в первоначальном направлении) и увеличивать его. При этом индукция в сердечнике уменьшится до нуля по кривой 5-6, где отрезок 0-6 – задерживающая, или коэрцитивная, сила H_C в первоначальном направлении, которая снова размагничивает сердечник – уничтожает остаточную индукцию. Дальнейшее увеличение напряженности приведёт к увеличению индукции от нуля до насыщения в первоначальном направлении по кривой 6-1.

Кривая 0-1 называется кривой первоначального намагничивания, а замкнутая кривая 1-2-3-4-5-6-1 называется петлёй гистерезиса. Гистерезис – греческое слово, означающее «отставание», т. е. изменение индукции отстаёт от изменения: напряжённость уменьшилась до нуля, а индукция ещё не равна нулю, или индукция только уменьшалась до нуля, а напряжённость уже увеличивается в обратном направлении.

Циклическое перемагничивание имеет место в магнитопроводах (сердечниках) электрических машин, трансформаторов, электроизмерительных приборов, дросселей и др., по обмоткам которых проходит переменный ток.

7.2 Ферромагнитные материалы

Свойства большинства ферромагнитных материалов являются одинаковыми, однако проявляются они по-разному в зависимости от химического состава материала. В этой связи различают две основные группы ферромагнитных материалов: магнитно-мягкие и магнитно-твёрдые.

Магнитно-мягкие ферромагнитные материалы обладают высокой проницаемостью ($\mu_r \approx 10^3 \div 10^6$), низкой задерживающей (коэрцитивной) силой ($H_c \leq 400 \text{ А/м}$) и узкой петлёй гистерезиса, т. е. малыми потерями на гистерезис.

Магнитно-мягкие ферромагнитные материалы легко намагничиваются и размагничиваются.

Магнитно-твёрдые ферромагнетные материалы обладают значительной магнитной проницаемостью (μ_r – порядка нескольких сотен), относительно высокой остаточной индукцией, большой задерживающей (коэрцитивной) силой ($5000 \div 240000$)А/м и имеют широкую петлю гистерезиса.

Из магнитно-твёрдых материалов изготавливаются постоянные магниты, применяемые в технике связи, электроизмерительной технике и т.п.

7.3 Классификация магнитных цепей

В состав многих электротехнических устройств входят магнитные цепи. Конструктивно различают неразветвленные и разветвленные магнитные цепи (рис. 7.4).

Характерной особенностью неразветвленной магнитной цепи (рис. 7.7 а) является то, что магнитный поток Φ , созданный токами в катушках для всех участков и сечений магнитной цепи, имеет одинаковое значение (как ток в неразветвленной электрической цепи). Для разветвленной магнитной цепи (рис. 7.4 б) характерно то, что созданный током магнитный поток Φ разветвляется.

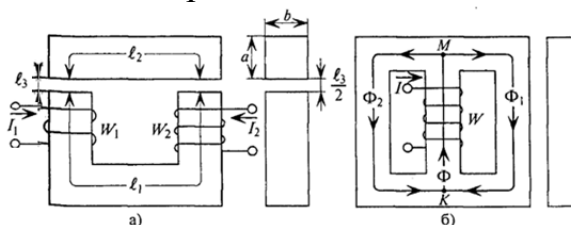


Рисунок 7.4 – Примеры магнитных цепей

Разветвленная магнитная цепи может быть симметричной или несимметричной. Цепь считается симметричной, если правая и левая её части имеют одинаковые размеры, выполнены из одинакового материала (включая воздушные зазоры) и действующие в каждой части магнитодвижущие силы IW одинаковы.

Магнитные цепи могут быть однородными и неоднородными. Однородная магнитная цепь представляет собой замкнутый сердечник, который по всей длине l имеет одинаковое сечение S и выполнен из определенного материала.

Неоднородная магнитная цепь состоит из нескольких однородных участков, каждый из которых по всей своей длине имеет одинаковое сечение и выполнен из определенного материала.

На рисунке 7.4 а изображена неразветвленная неоднородная магнитная цепь, состоящая из трех однородных участков длиной l_1 , l_2 и l_3 , где l_3 – воздушный зазор.

7.4 Закон Ома для магнитной цепи

Если по кольцевой катушке с числом витков W проходит ток I , то этот ток в сердечнике катушки длиной l и сечением S создаёт напряжённость (рис. 7.5).

$$H = \frac{IW}{l}.$$

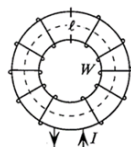


Рисунок 7.5 – Кольцевая катушка

На рисунке 7.5 изображена однородная неразветвлённая магнитная цепь, сердечник которой по всей длине l выполнен из одного материала с относительной магнитной проницаемостью μ_r . Тогда магнитный поток Φ и сердечнике кольцевой катушки можно определить по формуле

$$\Phi = BS = \mu_0 \mu_r \frac{IW}{l} S,$$

$$\Phi = \frac{IW}{\frac{l}{\mu_0 \mu_r S}}.$$

где числитель (IW) – магнитодвижущая сила, или магнитное напряжение магнитной цепи $U_M = IW$, а знаменатель $\frac{l}{\mu_0 \mu_r S}$ магнитное сопротивление магнитной цепи (по аналогии с электрическим сопротивлением, зависящим от длины, удельной проводимости и сечения проводника), т. е.

$$R_M = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S}.$$

Когда магнитный поток магнитной цепи

$$\Phi = \frac{U_M}{R_M}.$$

Это и есть математическое выражение закона Ома для разветвлённой однородной магнитной цепи, изображенной на рисунке 7.5, т. е. магнитный поток в рассматриваемой магнитной цепи пропорционален магнитному напряжению U_M , и обратно пропорционален магнитному сопротивлению R_M (как и ток по закону Ома для участка электрической цепи).

7.5 Расчет неоднородной магнитной цепи

Прямая задача расчёта неразветвлённой неоднородной магнитной цепи (рис. 7.4) решается в следующей последовательности.

1. По заданному магнитному потоку Φ , который для всех участков неразветвленной цепи имеет одинаковое значение, определяют магнитную индукцию B каждого участка

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}; B_2 = \frac{\Phi}{S_2}; B_3 = \frac{\Phi}{S_3}.$$

где S – площадь сечения участка.

Если задана магнитная индукция какого-либо участка $B_{уч}$, то находят магнитный поток этого участка $\Phi_{уч} = B_{уч} S_{уч}$, который для всех участков неразветвлённой цепи имеет одинаковое значение. Затем определяют магнитную индукцию остальных участков.

2. По кривым намагничивания материалов определяют напряженности ферромагнитных участков H_1 и H_2 . Напряженность в воздушном зазоре вычисляется по отношению $H_3 = \frac{B_3}{\mu_0}$.

3. Определив длину средней линии каждого участка, по закону полного тока (второй закон Кирхгофа для магнитной цепи) вычисляют намагничивающую силу рассчитываемой магнитной цепи $IW = H_1l_1 + H_2l_2 + H_3l_3$ или ток I , или витки W .

Обратная задача расчета неоднородной неразветвленной магнитной цепи – определение магнитного потока по заданной магнитодвижущей силе (МДС), может быть решена методом последовательных приближений. Для этого задаются несколькими значениями магнитного потока и для каждого из них решают прямую задачу расчета магнитной цепи. По результатам расчетов намагничивающих сил для разных магнитных потоков строят кривую зависимости $\Phi = f(IW)$ по которой и определяют искомый магнитный поток $\Phi_{иск}$ по заданной МДС $IW_{зад}$.

7.6 Законы Кирхгофа для магнитной цепи

При расчетах магнитных цепей, как и электрических, используют первый и второй законы (правила) Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма магнитных потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю:

$$\sum \Phi_k = 0.$$

Первый закон Кирхгофа для магнитных цепей следует из принципа непрерывности магнитного потока, известного из курса физики.

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма падений магнитного напряжения вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме МДС вдоль того же контура:

$$\sum U_M = \sum F = \sum HI.$$

Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей, по сути дела, есть иная форма записи закона полного тока.

7.7 Явление и ЭДС электромагнитной индукция, ЭДС самоиндукции, ЭДС взаимной индукции

Явление электромагнитной индукции было открыто Майклом Фарадеем в 1831 г. Он опытным путем установил, что при изменении магнитного поля внутри замкнутого проводящего контура в нем возникнет электрический ток, который называют индукционным током.

На концах проводника, который при движении пересекает силовые линии магнитного поля, возникает ЭДС, получившая название индуктированной ЭДС, а само явление названо электромагнитной индукцией.

Величина индуктированной ЭДС зависит: от скорости перемещения проводника в магнитном поле; длины проводника; магнитной индукции поля, создаваемого магнитном поле.

Индуктированная ЭДС определяется по формуле $E = Blv \cos \alpha$, где α – угол между направлением перемещения проводника и направлением магнитных силовых линий (рис. 7.6).

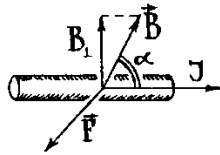


Рисунок 7.6 – Угол между направлениями силовых линий магнитного поля и движения проводника

Для получения индуцированной ЭДС безразлично, что именно перемещается: проводник в магнитном поле или магнитное поле относительно неподвижного проводника.

Направление индуцированной ЭДС и тока определяется по правилу правой руки (рис. 7.7).

Если правую руку расположить таким образом, чтобы магнитные силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а отогнутый большой палец был направлен в сторону движения проводника, то четыре вытянутых пальца укажут направление индуцированной ЭДС и тока.



Рисунок 7.7 – Определение напряжения индуцированной ЭДС

Если по катушке с числом витков W (рис. 7.8) проходит ток I , то этот ток создает в катушке магнитный поток Φ , величина которого пропорциональна току. Очевидно, пропорционально этому току и потокосцепление $\psi = \Phi W$.

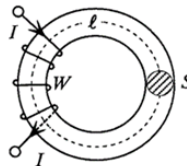


Рисунок 7.8 – Магнитное поле в катушке

$$\frac{\psi}{I}$$

Следовательно, отношение $\frac{\psi}{I}$ для данной катушки – величина постоянная. Эта постоянная величина обозначается буквой L и называется индуктивностью катушки:

$$L = \frac{\psi}{I}$$

$$[L] = \left[\frac{\psi}{I} \right] = \frac{Вб}{А} = \frac{В \cdot с}{А} = 1 Ом \cdot с = 1 Гн.$$

Если по катушке с индуктивностью L (рис. 7.8) пропустить переменный ток i , то он создает в катушке переменный магнитный поток, который индуцирует в витках катушки ЭДС самоиндукции e_L .

Явление наведения ЭДС самоиндукции в проводнике, контуре или тушке, вызванное изменением тока в самом проводнике, контуре и катушке, называется явлением самоиндукции.

ЭДС самоиндукции в катушке можно определить:

$$e_L = \frac{d\psi}{dt} = \frac{dLi}{dt} = -L \frac{di}{dt}.$$

Таким образом, ЭДС самоиндукции e_L в проводнике, контуре или катушке пропорциональна скорости изменения тока в этом, проводнике, контуре или катушке, взятой со знаком «минус».

Знак «минус» отражает здесь правило Ленца, которое в данном случае можно сформулировать так: индуцированный в катушке ток, вызванный ЭДС самоиндукции, противодействует изменения тока, вызвавшего эту ЭДС.

Если по катушке с индуктивностью L проходит ток I , то в магнитном поле этой катушки накапливается энергия, величина которой определяется:

$$W_{\text{магн}} = \frac{I^2 L}{2}.$$

Если две или несколько катушек расположить так, что магнитный поток одной из них пронизывает витки остальных, то такие катушки называют магнитосвязанными. Если по одной из магнитосвязанных катушек, например первой W_1 (рис. 7.9 а), пропустить ток i_1 , то он создаст в этой катушке магнитный поток Φ_1 , пропорциональный i_1 , часть которого $\Phi_{1,2}$ пронизывает витки второй катушки W_2 , создавая потокосцепление $\Psi_{1,2} = \Phi_{1,2} W_2$, пропорциональное i_1 . Часть магнитного потока Φ_1 , рассеивается Φ_p .

Если по второй катушке W_2 (рис. 7.9 а) проходит ток i_2 , то он создаёт в ней магнитный поток Φ_2 , пропорциональный i_2 , часть которого $\Phi_{2,1}$ пронизывает витки первой катушки W_1 , создавая потокосцепление $\Psi_{2,1} = \Phi_{2,1} W_1$, пропорциональное i_2 .

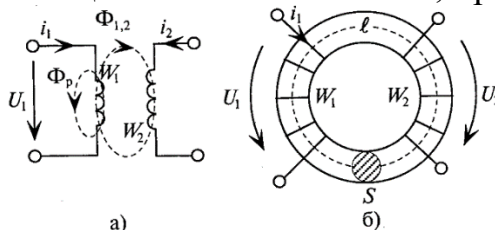


Рисунок 7.9 – Магнитосвязанные катушки

Для двух магнитосвязанных катушек отношение

$$\frac{\Psi_{1,2}}{i_{1,2}} = \frac{\Psi_{2,1}}{i_{2,1}} = M$$

Данная величина постоянная, обозначается буквой M и называется взаимной индуктивностью этих катушек.

Взаимная индуктивность M – это параметр магнитосвязанных проводников, контуров или катушек.

Взаимная индуктивность M измеряется в генри

При отсутствии рассеяния величина взаимной индуктивности

$$M = \sqrt{L_1 L_2}.$$

В общем случае

$$M = K \sqrt{L_1 L_2}.$$

Коэффициент K называют коэффициентом связи двух магнитосвязанных катушек

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

Коэффициент связи K показывает, какая часть созданного катушками магнитного потока пронизывает одновременно обе магнитосвязанные катушки. Коэффициент связи может изменяться от нуля до единицы, т. е. $0 \leq K \leq 1$.

Если по одной из магнитосвязанных катушек (рис. 7.9 б), например, первой, пропустить переменный ток i_1 , то он создаёт в ней переменный магнитный поток Φ_1 , часть которого $\Phi_{1,2}$ пронизывает витки второй катушки W_2 и индуцирует в них ЭДС взаимоиנדукции e_{M2} .

Явление наведения ЭДС взаимоиנדукции в одной из магнитосвязанных катушек, вызванное изменением тока в другой катушке, называется явлением взаимоиנדукции.

ЭДС взаимоиנדукции во второй катушке будет равна

$$e_{M2} = \frac{d\psi_{1,2}}{dt} = -\frac{dM i_1}{dt} = -M \frac{di_1}{dt}.$$

То есть ЭДС взаимоиנדукции в одной из магнитосвязанных катушек пропорциональна скорости изменения тока в другой катушке со знаком «минус».

Следовательно $e_{M1} = -M \frac{di_2}{dt}$.

Знак «минус» отражает правило Ленца.

Явление взаимоиנדукции лежит в основе работы электрических трансформаторов.

7.8 Вихревые токи

Во многих конструкциях электрических машин и аппаратов стальные сердечники перемещаются в постоянном магнитном поле или переменное магнитное поле пересекает неподвижные сердечники. В обоих случаях в сердечниках индуцируется ЭДС и течет электрический ток, который называется вихревым током.

Во избежание возникновения вихревых токов сердечники трансформаторов, электрических двигателей, электромагнитов изготавливают из отдельных, изолированных друг от друга пластинок электромеханической стали толщиной 0,1-0,5мм. Между листами помещается слой изоляционного лака. Изоляция между пластинками препятствует прохождению тока. Вихревой ток в таком сердечнике практически отсутствует.

Вихревые токи не всегда рассматриваются как вредное явление. Они находят применение в промышленности, например, в индукционных печах для нагрева и плавки металла, а также электромеханических счетчиках электрической энергии, в которых вращение диска происходит в результате взаимодействия вихревых токов в диске с магнитным полем катушек счетчика.

7.9 Назначение и принцип действия трансформаторов

Трансформатор – статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного напряжения одной величины в переменное напряжение другой величины одной и той же частоты. На рисунке 7.10 приведено условное обозначение трансформатора в принципиальных электрических схемах. К одной из обмоток трансформатора подводится переменное напряжение U_1 от источника питания. Эта обмотка называется первичной, а вторая – вторичной.

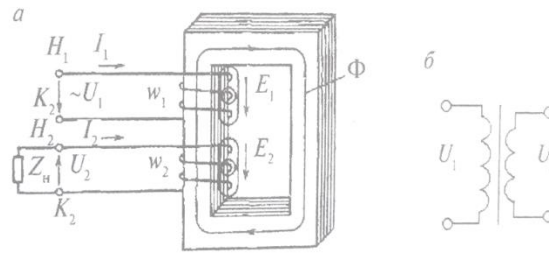


Рисунок 7.10 – упрощенная схема (а) и условное обозначение (б) трансформатора

Если к источнику переменного напряжения U_1 подключить выводы H_1 и K_1 первичной обмотки трансформатора с числом витков w_1 , то по обмотке потечет ток I_1 и магнитодвижущая сила $I_1 w_1$ (МДС) создаст переменный магнитный поток Φ . Переменный магнитный поток Φ создаст в обмотке w_1 , ЭДС E_1 , а в обмотке w_2 ЭДС E_2 . При подключении к выводам H_2 и K_2 какой-либо нагрузки Z_H электрическая цепь вторичной обмотки оказывается замкнутой и ЭДС E_2 вызовет в ней ток I_2 . Таким образом, электрическая энергия первичной цепи с параметрами U_1, I_1 и частотой f будет преобразована в энергию переменного тока вторичной цепи с параметрами U_2, I_2 и той же частотой f . $e_1/e_2 = E_1/E_2 = w_1/w_2 = k$

Отношение количества витков первичной обмотки трансформатора к количеству витков его вторичной обмотки k называется коэффициентом трансформации.

Если $w_1 < w_2$, то $k > 1$ и трансформатор в этом случае будет понижающим. При $w_1 > w_2$ коэффициент трансформации будет $k < 1$, а трансформатор будет повышающим.

Вопросы к теме 7

1. Назвать, от чего зависит магнитная индукция B в магнитопроводе катушки.
2. Дать определение гистерезису.
3. Дать определение кривой первоначального намагничивания.
4. Рассказать, где имеет место циклическое перемагничивания.
5. Сформулировать классификацию ферромагнитных материалов и привести примеры.
6. Привести пример простой магнитной цепи. Назвать классификацию магнитных цепей по конструкции.
7. Дать сравнительную характеристику неразветвленной и разветвленной магнитной цепи.
8. Записать формулы для вычисления магнитного сопротивления и магнитного потока магнитной цепи.
9. Записать формулу для вычисления магнитного напряжения поля по замкнутому контуру.
10. Рассказать алгоритм расчета прямой и обратной задачи неразветвленной однородной магнитной цепи.
11. Сформулировать закон Ома для магнитной цепи.
12. Сформулировать законы Кирхгофа для магнитной цепи.

ТЕМА 8 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СИНУСОИДАЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТОКЕ

8.1 Основные понятия

Переменным электрическим током называют ток, периодически изменяющийся по величине и направлению.

Синусоидальный переменный ток – ток, изменяющийся по синусоидальному закону. При синусоидальном токе ЭДС электромагнитной индукции, самоиндукции и взаимной индукции изменяются по синусоидальному закону.

Если в однородном магнитном поле с индукцией B равномерно со скоростью V вращается рамка (рис. 8.1), то в каждой активной стороне этой рамки длиной l индуцируется ЭДС электромагнитной индукции:

$$e = Bvl \sin \alpha,$$

где α – угол, под которым активный проводник рамки пересекает магнитное поле (угол между \vec{B} и \vec{V}), или угол поворота рамки относительно нейтральной плоскости NN' , как углы со взаимно перпендикулярными сторонами.

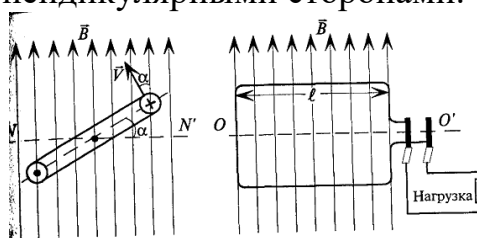


Рисунок 8.1 – Рамка в магнитном поле

Синусоидальная ЭДС $e = f(\alpha)$ изображена на графике (рис. 8.2). Как видно, синусоидальная ЭДС изменяется по величине и направлению.

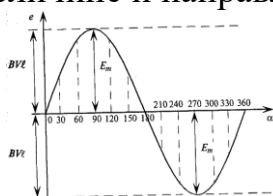


Рисунок 8.2 – График зависимости ЭДС от времени

8.2 Величины, характеризующие синусоидальную ЭДС

Амплитуда – это максимальное значение периодически изменяющейся величины. Обозначаются амплитуды прописными буквами с индексом m , т.е. E_m, U_m, I_m . (рис. 8.3).

Период – это время, в течение которого переменная величина делает полный цикл своих изменений, после чего изменения повторяются в той же последовательности. Обозначается период буквой T и измеряется в секундах, $[T]=1\text{с}$.

Частота – число периодов в единицу времени, т. е. величина обратная периоду.

Обозначается частота буквой $f, f = \frac{1}{T}$, и измеряется в герцах (Гц):

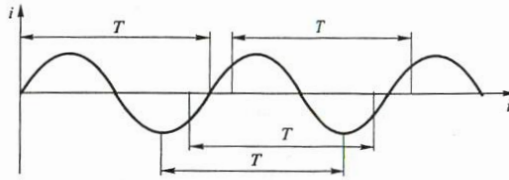


Рисунок 8.3 – График зависимости тока от времени

Угловая частота (угловая скорость) характеризуется углом поворота рамки в единицу времени. Обозначается угловая частота буквой ω : $\omega = \frac{\alpha}{t}$

Измеряется угловая частота в единицы радиан в секунду (рад/с), так как угол измеряется в радианах (рад).

Угловую частоту можно выразить следующим образом: $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$.

Мгновенное значение – это значение переменной величины в любой конкретный момент времени. Мгновенные значения обозначаются строчными буквами, т.е. e, i, u .

Мгновенные значения синусоидальных величин можно записывать так:

$$e = E_m \sin \omega t;$$

$$i = I_m \sin \omega t;$$

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Если в магнитном поле вращаются две жестко скрепленные между собой под каким-то углом одинаковые рамки (рис. 8.4 а) т.е. амплитуды ЭДС E_m и угловые частоты ω их одинаковы, то мгновенное значение их ЭДС можно записать в виде

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + \psi_1); e_2 = E_m \sin(\omega t + \psi_2),$$

где ψ_1 и ψ_2 – углы, определяющие значения синусоидальных величин e_1 и e_2 в начальный момент времени ($t=0$) и называют начальными фазами синусоид.

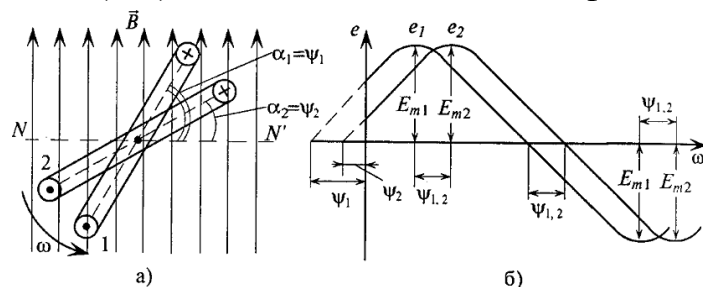


Рисунок 8.4 – Рамки в магнитном поле

Начальные фазы ψ_1 и ψ_2 этих ЭДС различны. Таким образом, каждая синусоидальная величина характеризуется амплитудой E_m , угловой частотой ω и начальной фазой ψ . Для каждой синусоиды начальные фазы являются постоянными.

Величина $(\omega t + \psi)$ называется фазой синусоиды.

Разность начальных фаз двух синусоидальных величин одинаковой частоты определяет углом сдвига фаз этих величин: $\psi_{1,2} = \psi_1 - \psi_2$

При вращении против часовой стрелки (рис. 3.4а) ЭДС в первой рамке достигает амплитудного и нулевого значения раньше, чем во второй, т.е. e_1 опережает по фазе e_2 или e_2 отстает по фазе от e_1 (рис. 8.4 б). Угол сдвига фаз $\psi_{1,2}$ показывает, на какой угол синусоидальная величина опережает или отстает от другой.

8.3 Векторная диаграмма

Для наглядности синусоидальные величины изображают векторами, вращающимися против часовой стрелки со скоростью, равной угловой частоте ω этих синусоид. Длина вектора в выбранном масштабе определяется амплитудой синусоиды, а угол поворота вектора против часовой стрелки относительно положительного направления оси абсцисс равен начальной фазе синусоиды. Таким образом, вектор учитывает все значения, характеризующие синусоидальную величину: амплитуду, угловую частоту и начальную фазу.

Например, три синусоидальные ЭДС одинаковой частоты $e_1 = E_{m1} \sin(\omega t + 45^\circ)$, $e_2 = E_{m2} \sin \omega t$ и $e_3 = E_{m3} \sin(\omega t - 60^\circ)$ можно изобразить векторами (рис. 3.5).

Совокупность нескольких векторов, изображающих синусоидальные величины одинаковой частоты в начальный момент времени, называется векторной диаграммой. На векторной диаграмме (рис. 8.5) наглядно видны амплитуды синусоид и углы сдвига фаз между ними.

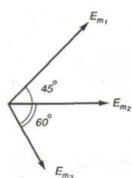


Рисунок 8.5 – Векторная диаграмма ЭДС

Широкое применение для расчетов получило сложение и вычитание с помощью векторных диаграмм. Сложение векторов осуществляется по правилу многоугольника.

8.4 Среднее и действующее значения переменного тока

Кроме амплитудных и мгновенных значений переменный ток, с напряжением, ЭДС характеризуются ещё средними и действующими (эффективными) значениями.

Среднее значение переменного тока равно величине такого постоянного тока, при котором через поперечное сечение проводника проходит то же количество электричества Q , что и при постоянном токе. Средние значения переменных величин обозначаются прописными буквами с индексом т.е. I_c , U_c , E_c .

Средние значения синусоидального напряжения и ЭДС за полупериод можно определить

$$U_c = \frac{2}{\pi} U_m = 0,637 U_m;$$

$$E_c = \frac{2}{\pi} E_m = 0,637 E_m;$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 I_m.$$

Действующее значения переменных величин обозначается прописными буквами без индексов: I , U , E . Действующее значение переменного тока I равно величине такого постоянного тока, которое за время, равное одному периоду переменного тока T , выделит в том же сопротивлении R такое же количество тепла, что и переменный ток i . Так же можно определить действующее значения синусоидального напряжения и ЭДС.

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707U_m;$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707E_m;$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707I_m.$$

При расчёте цепей переменного тока и их исследованиях чаще всего пользуются действующими значениями тока, напряжения и ЭДС. На шкалах измерительных приборов переменного тока указывается действующее значение переменного тока или напряжения.

Вопросы к теме 8

1. Рассказать о способе получения синусоидальной ЭДС и устройстве генератора переменного тока.
2. Дать определение переменному току.
3. Рассказать о величинах, характеризующих синусоидальную ЭДС.
4. Рассказать о способах выражения синусоидальных величин.
5. Дать определение действующему и среднему значению синусоидального тока.
6. Объяснить принцип сложения и вычитания синусоидальных величин.
7. Рассказать о принципе построения векторной диаграммы.

ТЕМА 9 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА. ЭЛЕМЕНТЫ И ПАРАМЕТРЫ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА. РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.

9.1 Цепь с активным сопротивлением. Активная мощность

Активным сопротивлением R обладают элементы, которые нагреваются при прохождении через них тока (проводники, лампы накаливания, нагревательные приборы и т. д.).

Если к активному сопротивлению R (рис. 9.1 а) приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, то и ток в этой цепи изменяется по синусоидальному закону (рис. 9.1 в):

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t,$$

Векторная диаграмма для цепи с активным сопротивлением изображена на рисунке 9.1 б, временная диаграмма изображена на рисунке 9.1 в.

Математическое выражение закона Ома для цепи переменного тока с активным сопротивлением имеет вид: $I = \frac{U}{R}$.

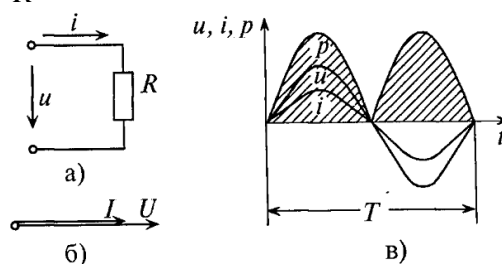


Рисунок 9.1 – Цепь с активным сопротивлением

Мгновенная мощность в цепи с активным сопротивлением определяется произведением мгновенных значений напряжения тока, т. е. $p = ui$. Это действие производится над кривыми тока и напряжения в определённом масштабе (рис. 9.1 в). в результате получена временная диаграмма мгновенной мощности p .

Мощность в цепи с активным сопротивлением изменяется по величине, но не изменяется по направлению (рис. 9.1 в). Эта мощность (энергия) необратима. От источника она поступает на потребитель и полностью преобразуется в другие виды мощности (энергии), т.е. потребляется. Такая потребляемая мощность называется активной.

Количественно мощность в цепи с активным сопротивлением определяется следующим образом:

$$p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin^2 \omega t = \frac{U_m I_m}{2} - \frac{U_m I_m}{2} \cos 2\omega t = UI - UI \cos 2\omega t.$$

Величина активной мощности в цепи синусоидального тока с активным сопротивлением с учётом закона Ома определяется выражением:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R},$$

где U – действующее значение напряжения; I – действующее значение тока.

Единицей активной мощности является ватт: $[P] = 1 \text{ Вт}$.

9.2 Цепь с идеальной индуктивностью.

Реактивная мощность в цепи с индуктивностью

Идеальной называют индуктивность L такой катушки, активным сопротивлением R которой можно пренебречь, т. е. $R=0$ и $C=0$.

Если в цепи идеальной катушки индуктивностью L (рис. 9.2 а) проходит синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$, то этот ток создает в катушке синусоидальный магнитный поток $\phi = \Phi_m \sin \omega t$, который индуцирует в катушке ЭДС самоиндукции, равную

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{dI_m \sin \omega t}{dt} = -I_m \omega L \cos \omega t = I_m \omega L \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

$$E_m = I_m \omega L$$

$$e_L = E_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

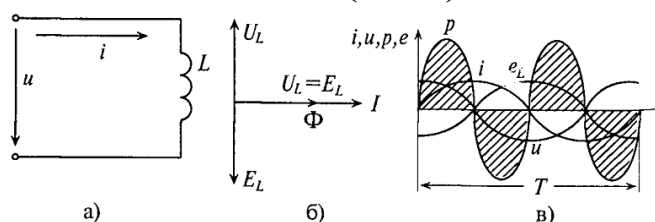


Рисунок 9.2 – Цепь с идеальной индуктивностью

По второму закону Кирхгофа для мгновенных значений можно написать

$$u + e_L = iR = 0.$$

Напряжение, приложенное к цепи с идеальной индуктивностью:

$$u = -e_L = -I_m \omega L \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I_m \omega L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

$$U_m = I_m \omega L$$

$$u = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Таким образом, напряжение, приложенное к цепи с идеальной индуктивностью, как и ток в этой цепи, изменяется по синусоидальному закону, но опережает ток по фазе на угол $90^\circ = \frac{\pi}{2}$ (рис. 9.2 б, в).

Закон Ома для этой цепи можно записать иначе: $I = \frac{U}{X_L}$, где $X_L = \omega L = 2\pi fL$

Мгновенная мощность для цепи синусоидального тока с идеальной катушкой равна произведению мгновенных значений напряжения и тока

$$p = ui = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \cdot I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin \omega t \cdot \cos \omega t,$$

где $\sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \cos \omega t$.

Следовательно, $p = U_m I_m \sin \omega t \cdot \cos \omega t$.

Полученное уравнение умножают и делят на 2: $p = \frac{U_m I_m}{2} 2 \sin \omega t \cdot \cos \omega t = UI \sin 2\omega t$.

Таким образом, мощность в цепи синусоидального тока с идеальной катушкой индуктивности изменяется по синусоидальному закону с двойной частотой.

На диаграмме (рис. 9.2 в) видно, что мгновенная мощность ($p = ui$) в рассматриваемой цепи изменяется по синусоидальному закону с двойной частотой. Такая колеблющаяся мощность (энергия), в отличие от активной, т.е. потребляемой, называется реактивной.

Обозначается реактивная мощность буквой Q и измеряется в варах, т. е. $[Q]=1\text{вар}$ (вольт-ампер реактивный).

Величина реактивной мощности в рассматриваемой цепи определяется выражением

$$Q_L = UI = I^2 X_L = \frac{U^2}{X_L}.$$

9.3 Цепь с идеальной ёмкостью.

Реактивная мощность в цепи с конденсатором

Если конденсатор подключен к источнику с синусоидальным напряжением (рис. 9.3 а), то токи цепи конденсатора существует всё время, пока цепь замкнута, и амперметр А покажет этот ток.

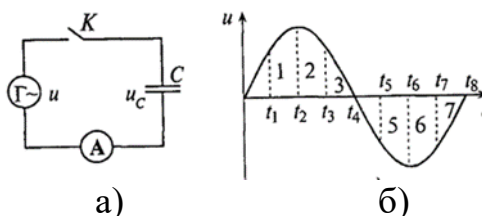


Рисунок 9.3 – Цепь с идеальной ёмкостью

Таким образом, если к конденсатору ёмкостью C приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, то в цепи конденсатора проходит ток i :

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = C \frac{dU_m \sin \omega t}{dt} = U_m \omega C \cos \omega t = U_m \omega C \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$i = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Ток в цепи конденсатора, как и напряжение, приложенное к его обкладкам, изменяется по синусоидальному закону, однако опережает это напряжение по фазе на угол 90° . Следовательно, напряжение отстает по фазе от тока на $90^\circ = \frac{\pi}{2}$ (рис. 9.4 б).

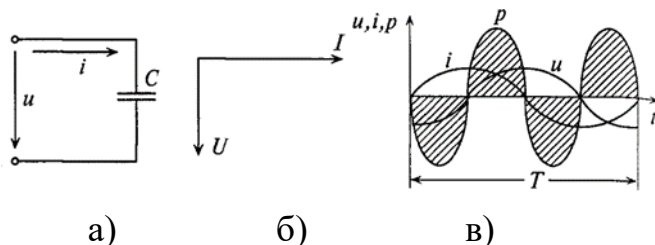


Рисунок 9.4 – Цепь с идеальной ёмкостью

Сопротивлением конденсатора X_C , которое называется ёмкостным сопротивлением: $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$.

Закон Ома для цепи с конденсатором можно записать: $I = \frac{U}{X_C}$.

Мгновенная мощность в цепи с конденсатором

$$p = ui = -U_m \cos \omega t \cdot I_m \sin \omega t = -\frac{U_m I_m}{2} 2 \cos \omega t \cdot \sin \omega t = -UI \sin 2\omega t.$$

Мощность в цепи с конденсатором, подключённым к источнику с синусоидальным напряжением, изменяется по синусоидальному закону с двойной частотой (рис. 9.4 в). В цепи переменного тока с конденсатором происходит колебание мощности (энергии) между источником и электрическим полем конденсатора. Такая колеблющаяся, но не потребляемая мощность называется реактивной мощностью.

Величина реактивной мощности в цепи конденсатора определяется выражением

$$Q_C = UI = I^2 X_C = \frac{U^2}{X_C}.$$

9.4 Цепь с активным сопротивлением и индуктивностью

В электрических цепях переменного тока часто встречаются последовательно соединенные резисторы и индуктивности. Частным случаем такого соединения можно считать включенную в цепь катушку любого электротехнического устройства, обладающую активным сопротивлением R и индуктивностью L (рис. 9.5). Такую катушку часто называют реальной.

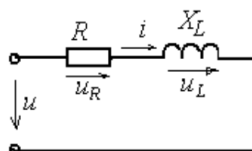


Рисунок 9.5 – Последовательная цепь с активным сопротивлением и индуктивностью

Напряжение $u = iR + L \frac{di}{dt} = u_R + u_L$ называется полным напряжением, первое слагаемое $u_R = iR$ – активным напряжением (падением напряжения на активном сопротивлении), второе слагаемое $u_L = L \frac{di}{dt}$ – реактивным (индуктивным) напряжением (падением напряжения на индуктивном сопротивлении).

Следует учесть, что оба слагаемых в правой части являются синусоидальными величинами. Напряжение u_R и ток совпадают по фазе, а u_L опережает ток на 90° .

$$u = RI_m \sin \omega t + \omega LI_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

При построении векторной диаграммы (рис. 9.6 а) за исходный вектор принимают вектор тока I , который совмещают с положительным направлением оси абсцисс. Вектор активного напряжения $U_R = RI$ откладывают по направлению вектора тока I , а вектор индуктивного напряжения $U_L = X_L I$ проводят под углом 90° к вектору тока I . Замыкающий (резльтирующий) вектор напряжения определяет полное напряжение U . Из векторной диаграммы видно, что полное напряжение U опережает по фазе ток I на угол φ . Величину угла φ можно определить из соотношения сторон треугольника напряжений:

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U}.$$

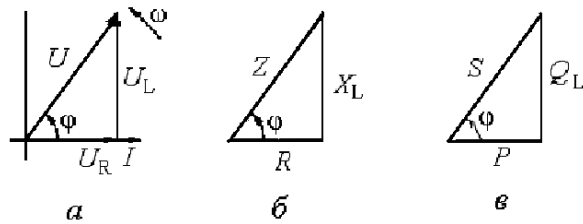


Рисунок 9.6 – Треугольник напряжений(а); сопротивлений(б); мощностей(в) при последовательном соединении активного сопротивления и индуктивности

Полное напряжение

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L)^2} = I\sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Величина $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ называется полным сопротивлением цепи переменному току.

$$I = \frac{U}{Z} \text{ – выражение закона Ома для цепи переменного тока.}$$

Если напряжения в треугольнике напряжений разделить на ток I , получим подобный ему треугольник сопротивлений (рис. 3.11б).

Из треугольника сопротивлений можно найти

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z};$$

$$\sin \varphi = \frac{X_L}{Z};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R}.$$

Определим мгновенную мощность цепи. При токе $i = I_m \sin \omega t$ напряжение будет выражаться формулой $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$. Тогда мгновенная мощность $p = ui = I_m \sin \omega t \cdot U_m \sin(\omega t + \varphi)$. Умножение производим как в цепи с индуктивностью. Изменение мгновенной мощности показано на рисунке 9.7. Из графика мгновенной мощности видно, что она в течение периода четыре раза меняет знак.

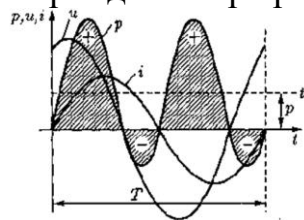


Рисунок 9.7 – Изменение напряжения, тока и мощности в цепи в последовательной цепи с активным сопротивлением и индуктивностью

Умножим стороны треугольника напряжений на ток в цепи I . В результате получим подобный треугольник мощностей (рис. 9.6 в). Один из катетов будет соответствовать активной мощности P , другой – реактивной Q_L . Гипотенуза треугольника будет соответствовать полной мощности S .

Из треугольника мощностей можно найти:

$$P = U_R I = I^2 R = UI \cos \varphi,$$

$$Q_L = U_L I = I^2 X_L = UI \sin \varphi,$$

$$S = UI = I^2 Z = \sqrt{P^2 + Q_L^2}.$$

Полная мощность измеряется в вольт-амперах (ВА).

Из треугольника мощностей можно также определить:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S},$$

$$\sin \varphi = \frac{Q_L}{S},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_L}{P}.$$

Отношение активной мощности цепи P к полной мощности S называется коэффициентом мощности.

Отношение реактивной мощности цепи Q_L к активной мощности P называется коэффициентом реактивной мощности.

9.5 Цепь с активным сопротивлением и емкостью

В электрических цепях переменного тока часто встречаются последовательно соединенные резисторы и емкости. Частным случаем такого соединения можно считать включенный в цепь реальный конденсатор, обладающий активным сопротивлением R и емкостью C (рис. 9.8). В цепи протекает ток $i = I_m \sin \omega t$. Напряжение цепи в любой момент времени состоит из двух слагаемых: $u = u_R + u_C$.

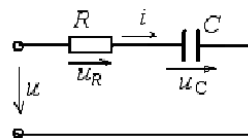


Рисунок 9.8 – Последовательная цепь с активным сопротивлением и емкостью

Активное напряжение совпадает по фазе с током: $u_R = U_m \sin \omega t$.

Емкостное напряжение отстает по фазе от тока на 90° : $u_C = U_m \sin(\omega t - 90^\circ)$.

Чтобы определить действующее значение напряжения U , построим векторную диаграмму (рис. 9.9 а).

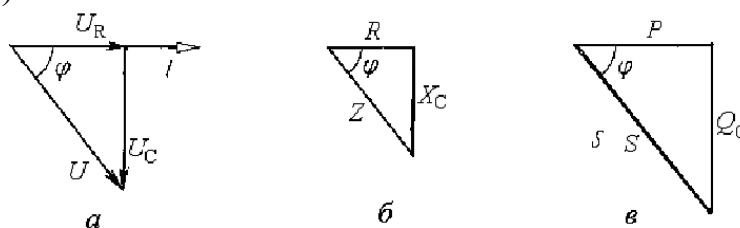


Рисунок 9.9 – Треугольник напряжений(а); сопротивлений(б); мощностей(в) при последовательном соединении активного сопротивления и емкости

Построение диаграммы начнем с вектора тока I , отложив его горизонтально. Вектор падения напряжения U_R на активном сопротивлении откладываем по направлению вектора I . Вектор емкостного падения напряжения U_C отложим с отставанием от вектора тока на угол 90° , то есть повернем его относительно вектора тока по часовой стрелке. При сложении векторов U_R , U_C получим результирующий вектор U (рис. 9.9 а)

Из треугольника напряжений можно найти коэффициент мощности цепи:

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U}.$$

Значения напряжений в треугольнике напряжений разделим на значение тока I , получим треугольник сопротивлений (рис. 9.9 б). Из треугольника сопротивлений можно найти

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z};$$

$$\sin \varphi = \frac{X_C}{Z};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R}.$$

Определим мгновенную мощность цепи. При напряжении $u = U_m \sin \omega t$ ток будет выражаться формулой $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$.

Тогда мгновенная мощность $p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t + \varphi)$. Умножение производим как в цепи с индуктивностью. Изменение мгновенной мощности показано на рисунке 9.10.

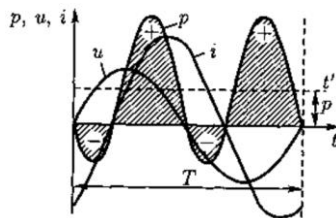


Рисунок 9.10 – Изменение напряжения, тока и мощности в последовательной цепи с активным сопротивлением и емкостью

Из графика мгновенной мощности видно, что она в течение периода четыре раза меняет знак. Умножим стороны треугольника напряжений на ток в цепи I . В результате получим подобный треугольник мощностей (рис. 9.9 в). Один из катетов будет соответствовать активной мощности P , другой – реактивной Q_C . Гипотенуза треугольника будет соответствовать полной мощности S .

Из треугольника мощностей можно найти:

$$P = U_R I = I^2 R = UI \cos \varphi,$$

$$Q_C = U_C I = I^2 X_C = UI \sin \varphi,$$

$$S = UI = I^2 Z = \sqrt{P^2 + Q_C^2}.$$

Реактивная емкостная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (вар). Из треугольника мощностей можно также определить:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S},$$

$$\sin \varphi = \frac{Q_C}{S},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_C}{P}.$$

9.6 Неразветвленная цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью

Если в неразветвлённой цепи с R , L и C (рис. 9.12 а) протекает синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$, то он создает падение напряжения на всех участках цепи:

$$u_a = U_{ma} \sin \omega t, u_L = U_{mL} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \text{ и } u_C = U_{mC} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Мгновенное значение напряжения дети определяется по формуле:

$$u = U_m \sin(\omega t \pm \varphi).$$

Так как в рассматриваемой цепи включены два реактивных сопротивления X_L и X_C , то возможны три режима работы цепи: 1) $X_L > X_C$; 2) $X_L < X_C$; 3) $X_L = X_C$.

Векторная диаграмма цепи для режима $X_L > X_C$ изображена на рисунке 9.11 б.

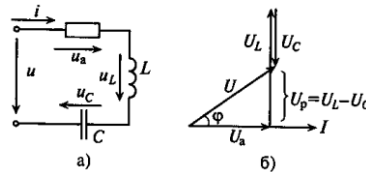


Рисунок 9.11 – Неразветвленная цепь с активным сопротивлением,
индуктивностью и емкостью

Знак перед углом сдвига фаз φ зависит от режима работы цепи. Если в рассматриваемой цепи преобладает индуктивное напряжение (сопротивление), т. е. $U_L > U_C$, то цепь имеет индуктивный характер и напряжение U опережает по фазе ток $I (+\varphi)$.

Если в цепи преобладает ёмкостное напряжение (сопротивление), т. е. $U_L < U_C$, то цепь имеет ёмкостной характер и напряжение U отстает по фазе от тока $I (-\varphi)$.

Из векторной диаграммы (рис. 3.16б) следует:

$$u = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{I^2 R^2 + (IX_L - IX_C)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Сопротивление R может включать в себя сопротивление самостоятельного резистора или активное сопротивление реальной катушки и конденсатора.

Математическое выражение закона Ома для неразветвленной цепи с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{Z},$$

где Z – полное сопротивление неразветвленной цепи с R , L и C , т. е.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

На рисунке 9.12 изображены векторная диаграмма напряжений, треугольники сопротивлений и мощностей для рассматриваемой цепи.

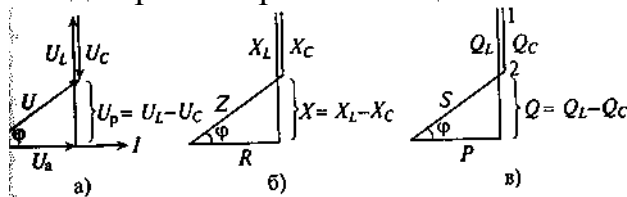


Рисунок 9.12 – Векторная диаграмма напряжений, треугольники сопротивлений и мощностей для рассматриваемой цепи

Знак и значение угла φ можно определить из треугольника сопротивлений (рис. 9.12 б):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} = \frac{X_L - X_C}{R}$$

$$\sin \varphi = \frac{X}{Z} = \frac{X_L - X_C}{Z}$$

Из треугольника мощностей (рис. 9.12 в) видно, что в цепи с R , L и C кроме активной мощности $P = S \cos \varphi$ имеется реактивная мощность $Q = S \sin \varphi$.

Из треугольника мощностей (рис. 9.12 в) видно, что реактивная мощность, которая загружает источник и провода $Q = Q_L - Q_C$.

Полная мощность цепи определяется по формуле: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

9.7 Схема замещения конденсатора с параллельным соединением элементов.

Векторная диаграмма токов в цепи с конденсатором

В реальном конденсаторе наряду с изменением энергии электрического поля (это характеризует реактивная мощность Q) из-за несовершенства диэлектрика идет необратимый процесс преобразования электрической энергии в тепло, скорость которого выражается активной мощностью P . Поэтому в схеме замещения реальный конденсатор должен быть представлен активным и реактивным элементами.

Реальный конденсатор (с потерями) можно представить эквивалентной схемой параллельного соединения активной G и емкостной B_c проводимостей (рис. 9.13), причем активная проводимость определяется мощностью потерь в конденсаторе $G = P/U_c^2$, а емкость – конструкцией конденсатора. Предположим, что проводимости G и B_c для такой цепи известны, а напряжение имеет уравнение $u = U_m \sin \omega t$.

Требуется определить токи в цепи и мощность.

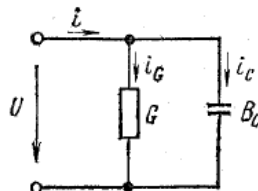


Рисунок 9.13 – Схема замещения реального конденсатора

Исследование цепи с активным сопротивлением и цепи с емкостью показало, что при синусоидальном напряжении токи в них так же синусоидальны. При параллельном соединении ветвей G и B_c , согласно первому закону Кирхгофа, общий ток i равен сумме токов в ветвях с активной и емкостной проводимостями: $i = i_G + i_c$

Для определения действующей величины общего тока I методом векторного сложения построим векторную диаграмму согласно уравнению: $I = I_G + I_C$

Действующие величины составляющих тока: $I_G = GU$, $I_C = B_c U$

Первым на векторной диаграмме изображается вектор напряжения U (рис. 9.14 а), его направление совпадает с положительным направлением оси, от которой отсчитываются фазовые углы (начальная фаза напряжения $\varphi_a = 0$).

Вектор I_G совпадает по направлению с вектором U , а вектор I_C направлен перпендикулярно вектору U с положительным углом. Из векторной диаграммы видно, что вектор общего напряжения отстает от вектора общего тока на угол φ , величина

которого больше нуля, но меньше 90° . Вектор I является гипотенузой прямоугольного треугольника, катеты которого – составляющие его векторы I_G и I_C :

$$I_G = I \cos \varphi, I_C = I \sin \varphi, I = \sqrt{I_G^2 + I_C^2}$$

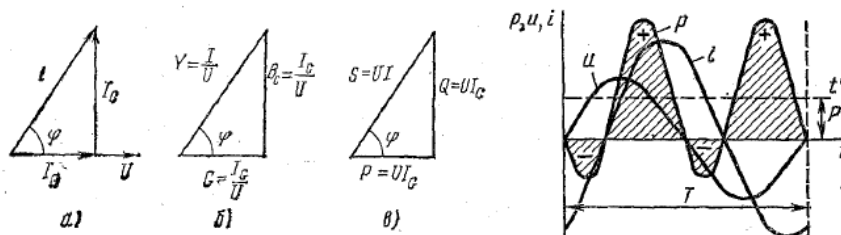


Рисунок 9.14 – Векторная диаграмма токов и треугольники проводимостей и мощностей в цепи с конденсатором

При напряжении $u = U_m \sin \omega t$ в соответствии с векторной диаграммой уравнение тока $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$.

Стороны треугольников токов, выраженные в единицах тока, разделим на напряжение U . Получим подобный треугольник проводимостей (рис. 9.14 б), катетами которого являются активная $G = I_G/U$ и емкостная $B_c = I_C/U$ проводимости, а гипотенузой – полная проводимость цепи $Y = I/U$.

Из треугольника проводимостей: $Y = \sqrt{G^2 + B_c^2}$.

9.8 Схема замещения реальной катушки с параллельным соединением элементов

Для реальной катушки можно составить и другую расчетную схему – с параллельным соединением двух ветвей: с активной G и индуктивной B_L проводимостями. На рисунке 9.15 б эта схема показана в сравнении со схемой последовательного соединения активного и индуктивного сопротивлений (рис. 9.15 а). Схемы (рис. 9.15 а,б) эквивалентны в том смысле, что при одинаковом напряжении сохраняются неизменными ток в неразветвленной части цепи, активная и реактивная мощности.

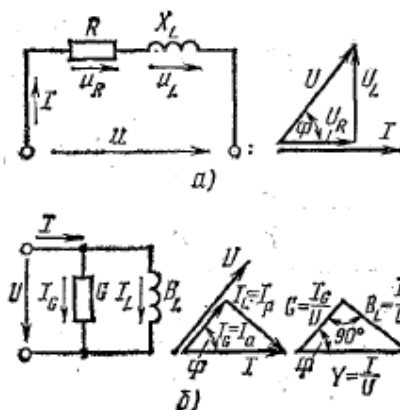


Рисунок 9.15 – Варианты схемы замещения катушки индуктивности

Вектор тока I можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие и в соответствии со схемой и векторной диаграммой (рис. 9.15 б) выразить векторным равенством: $I = I_G + I_L$

Вектор тока I и его составляющие I_G и I_L образуют прямоугольный треугольник, поэтому: $I = \sqrt{I_G^2 + I_L^2}$.

Составляющая тока в активном элементе: $I_G = I \cos \varphi$

Проекция вектора тока I на направление напряжения называется активной составляющей вектора тока и обозначается I_a .

Составляющая тока в реактивном элементе: $I_L = I \sin \varphi$

Из треугольника проводимостей

$$Y = \sqrt{G^2 + B_L^2};$$

$$G = \frac{I_G}{U} = \frac{I \cos \varphi}{IZ} = \frac{R}{Z^2};$$

$$B_L = \frac{I_L}{U} = \frac{I \sin \varphi}{IZ} = \frac{X_L}{Z^2};$$

$$Y = \frac{I}{U} = \frac{1}{Z}.$$

Кроме того, $\cos \varphi = \frac{I_G}{I} = \frac{G}{Y}$; $\sin \varphi = \frac{I_L}{I} = \frac{B_L}{Y}$; $\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_L}{I_G} = \frac{B_L}{G}$.

9.9 Резонанс напряжений

Если в цепи синусоидального тока с последовательно соединенными конденсатором ёмкостью C и катушкой с сопротивлением R и индуктивностью L (рис. 9.16 а) равны реактивные сопротивления, то в цепи наступает резонанс напряжений. Равенство реактивных сопротивлений является условием резонанса напряжений.

$$X_L = X_C.$$

$$\omega_{\text{рез}} L = \frac{1}{\omega_{\text{рез}} C}.$$

тогда частота резонанса определяется выражением

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0.$$

Резонанс напряжений имеет место в неразветвленной цепи с L и C тогда, когда частота вынужденных колебаний (частота источника) $\omega_{\text{рез}}$, будет равна частоте собственных колебаний резонансного контура ω_0 . Следовательно, добиться резонанса напряжений можно изменением частоты источника $\omega_{\text{рез}}$ или изменением параметров колебательного контура L или C , т.е. изменением частоты собственных колебаний ω_0 .

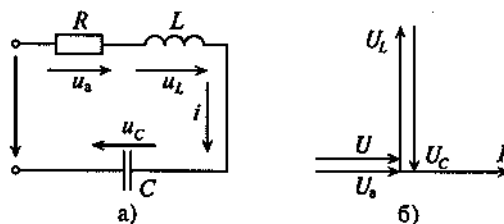


Рисунок 9.16 – Схема включения элементов электрической цепи для наступления резонанса напряжения

Полное сопротивление цепи (рис. 9.16 а) при резонансе напряжений определяется по формуле: $Z_{рез} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + 0} = R$, так как, $X_L - X_C = 0$.

Ток в неразветвленной цепи при резонансе напряжений максимальный:

$$I_{рез} = \frac{U}{Z_{рез}} = \frac{U}{R}.$$

Реактивные сопротивления при резонансе напряжений равны между собой, т. е.

$$\frac{1}{\omega_{рез} C} = \omega_{рез} L = \frac{1}{\sqrt{LC}} L = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_6.$$

Таким образом, реактивные сопротивления при резонансе напряжений равны (каждое) волновому сопротивлению Z_6 , которое называют характеристическим сопротивлением:

$$Z_6 = X_L = X_C = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Напряжения на индуктивности U_L и на емкости U_C при резонансе напряжений равны между собой, так как равны сопротивления.

$$U_L = IX_L = IZ_6 = IX_C = U_C.$$

Данное равенство определяет название «резонанс напряжений»

Так как U_L и U_C изменяются в противофазе, то напряжение в резонансном режиме равно напряжению на активном сопротивлении U_a , т. е. $U = U_a$, что видно на векторной диаграмме (рис. 9.16 б).

На резонансных кривых чётко просматриваются значения этих параметров при частоте резонанса $\omega_{рез}$ (рис. 9.17)

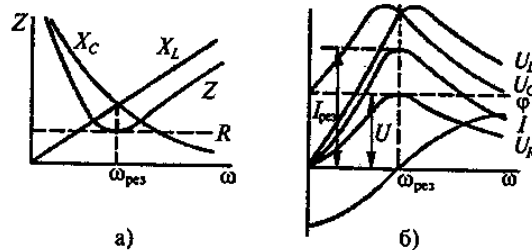


Рисунок 9.17 – Резонансные кривые

9.10 Резонанс токов

Резонанс токов в цепи параллельным включением катушки и конденсатора (в различных ветвях) возникает при равенстве реактивных проводимостей в ветвях: $b_1 = b_2$ или $b_L = b_C$.

Данное выражение является условием резонанса током в разветвленных цепях синусоидального тока.

Полная проводимость при этом условии

$$y_{рез} = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + 0} = g_1 + g_2 = g,$$

так как $b_1 - b_2 = 0$.

Ток в неразветвленной части цепи при резонансе токов имеет минимальную величину: $I_{рез} = Uy_{рез} = Ug$.

Реактивные токи в ветвях при резонансе токов равны между собой

$$I_{p1} = Ub_L = Ub_C = I_{p2}.$$

Это равенство и определяет название «резонанс токов».

Векторная диаграмма при резонансе токов (рис. 9.18). Реактивные токи находятся в противофазе, поэтому ток в неразветвленной части цепи I при резонансе токов равен активному току I_a , и совпадает по фазе с напряжением, т. е. $\varphi=0$, а $\cos\varphi=1$. Следовательно, вся мощность цепи S при резонансе токов является активной P : $P = S \cos\varphi = S$.

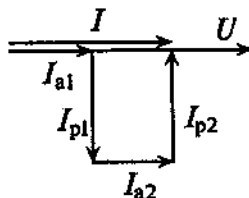


Рисунок 9.18 – Векторная диаграмма при резонансе токов

Частота при резонансе токов определяется:

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}}.$$

Вопросы к теме 9

1. Рассказать о цепи переменного тока с активным сопротивлением. Привести выражение тока и мощности при синусоидальном напряжении и вид векторной диаграммы.
2. Рассказать о цепи переменного тока с индуктивностью. Сформулировать понятие индуктивного сопротивления. Привести выражение напряжения и мощности при синусоидальном токе и вид векторной диаграммы.
3. Рассказать о цепи переменного тока с емкостью. Сформулировать понятие емкостного сопротивления. Привести выражение тока и мощности при синусоидальном напряжении и вид векторной диаграммы.
4. Охарактеризовать полное сопротивление цепи. Привести формулу для расчета полного сопротивления цепи.
5. Перечислить виды проводимостей. Охарактеризовать каждый из видов.
6. Перечислить виды мощностей в электрической цепи переменного тока. Охарактеризовать каждый вид мощности. Объяснить порядок построения треугольника мощностей.
7. Сформулировать понятие о треугольниках сопротивления и мощностей. Объяснить порядок построения треугольника сопротивлений.
8. Сформулировать понятия схемы замещения катушки индуктивности и конденсатора с потерями.
9. Рассказать о резонансе токов в цепи переменного тока. Назвать условие его возникновения.
10. Рассказать о резонансе напряжений в цепи переменного тока. Назвать условие его возникновения.

ТЕМА 10 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ. СИМВОЛИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

10.1 Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью

В неразветвленных цепях переменного тока могут быть включены последовательно резисторы, индуктивности и конденсаторы. Расчет цепи заключается в определении напряжений на элементах цепи при протекании по ним общего тока, мощностей элементов, коэффициентов мощности. На рисунке 10.1 приведена неразветвленная цепь с R , L и C .

Предположим, что известен ток в цепи $i = I_m \sin \omega t$

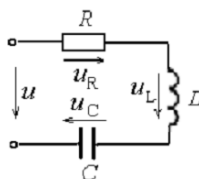


Рисунок 10.1 – Неразветвленная цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью

Определим реактивные сопротивления

$$X_L = \omega L, X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Мгновенное значение приложенного к цепи напряжения : $u = u_R + u_L + u_C$.

Напряжение на активном сопротивлении u_R совпадает по фазе с током i , напряжение на индуктивности u_L опережает ток на 90° , а напряжение на емкости u_C отстает от тока на 90° .

Действующее значение приложенного к цепи напряжения $U = U_R + U_L + U_C$ определим методом векторного сложения.

При построении векторной диаграммы сначала отложим горизонтально вектор тока I (рис. 10.2). Вектор падения напряжения на активном сопротивлении U_R отложим совпадающим с вектором тока I . От конца вектора U_R отложим вверх (опережающий ток на 90°) вектор индуктивного падения напряжения U_L . От конца вектора U_L отложим вниз (отстающий от тока на 90°) вектор емкостного падения напряжения U_C .

Результирующий вектор U будет являться вектором приложенного к цепи напряжения. Величина $U_L - U_C$ является падением напряжения на реактивных элементах L и C .

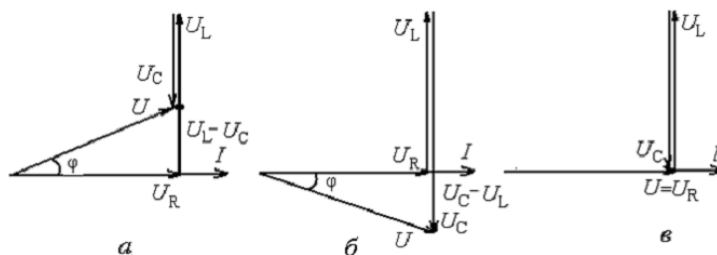


Рисунок 10.2 – Векторные диаграммы для цепи с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью: а – $X_L > X_C$; б – $X_L < X_C$; в – $X_L = X_C$

В рассматриваемой электрической цепи можно выделить три режима: $X_L > X_C$ (рис. 10.2 а); $X_L < X_C$ (рис. 10.2 б); $X_L = X_C$ (рис. 10.2 в). В первом режиме $U_L > U_C$, а угол φ , образованный вектором тока и результирующего напряжения, положительный, т. е. напряжение опережает ток. Цепь имеет активно-индуктивный характер. Во втором случае $U_L < U_C$, а угол φ , образованный вектором тока и результирующего напряжения, отрицательный, т.е. напряжение отстает от тока. Цепь имеет активно-емкостной характер. При равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений равны и напряжения на этих элементах. Приложенное напряжение равно активному напряжению. Этот режим называется резонансом напряжений.

Разделив напряжения в треугольнике напряжений на ток, получим треугольник сопротивлений (рис. 10.3 а), а умножив эти напряжения на ток, получим треугольник мощностей (рис. 10.3 б).

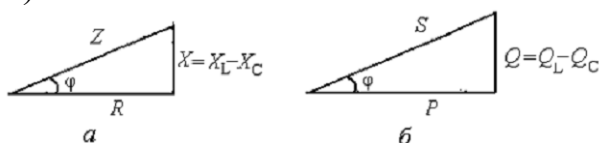


Рисунок 10.3 – Треугольник сопротивлений(а); треугольник мощностей(б) неразветвленной цепи

$$\text{Полное сопротивление цепи } Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$\text{Активная мощность } P = U_R I = I^2 R = UI \cos \varphi$$

$$\text{Реактивная } -Q = (U_L - U_C) I = I^2 (X_L - X_C) = UI \sin \varphi$$

$$\text{Полная } S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

$$\text{Коэффициент мощности } \cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{Z} = \frac{P}{S}.$$

Реактивная мощность может иметь разные знаки. Индуктивная мощность положительна, емкостная – отрицательна. Активная и полная мощности всегда положительны.

10.2 Проводимость, расчет электрических цепей методом проводимостей

Для расчета сложных электрических цепей, и в особенности цепей переменного тока, целесообразно вместо сопротивления использовать проводимость.

Проводимость в цепи постоянного тока g – величина, обратная сопротивлению R : $g = \frac{1}{R}$.

В цепях переменного тока, как известно, существует три типа сопротивлений: активное R , реактивное X и полное Z . По аналогии с этим введено и три типа проводимостей: активная g , реактивная b и полная y . Однако только полная проводимость y является величиной, обратной полному сопротивлению Z : $y = \frac{1}{Z}$.

Для введения активной g и реактивной b проводимостей рассмотрим цепь переменного тока из последовательно соединенных активного R и индуктивного X сопротивлений (рис. 10.4 а). Построим для нее векторную диаграмму (рис. 10.4 б). Ток в цепи \vec{I} разложим на активную \vec{I}_a и реактивную \vec{I}_b составляющие

и от полученного треугольника токов перейдем к треугольнику сопротивлений (рис. 10.4 в). Из последнего имеем:

$$R = Z \cos \varphi; \cos \varphi = \frac{R}{Z},$$

$$X = Z \sin \varphi; \sin \varphi = \frac{X}{Z}.$$

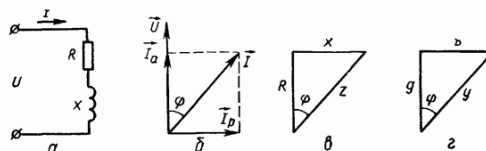


Рисунок 10.4 – Цепь с активным и индуктивным сопротивлениями
Из векторной диаграммы (рис.3.27б) имеем:

$$I_a = I \cos \varphi = \frac{U R}{Z Z} = U \frac{R}{Z^2} = U g,$$

где $g = \frac{R}{Z^2}$ – активная проводимость,

$$I_p = I \sin \varphi = \frac{U X}{Z Z} = U \frac{X}{Z^2} = U b,$$

где $b = \frac{X}{Z^2}$ – реактивная проводимость.

Теперь установим взаимосвязь между проводимостями. Для рассматриваемой цепи имеем:

$$\vec{I} = \vec{I}_a + \vec{I}_p \text{ и } I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}.$$

$$I = \sqrt{(Ug)^2 + (Ub)^2} = U \sqrt{g^2 + b^2} = Uy = \frac{U}{Z},$$

где $y = \frac{1}{Z} = \sqrt{g^2 + b^2}$ – полная проводимость цепи.

По аналогии с треугольником сопротивлений (рис. 10.5 в) строим треугольник проводимостей (рис. 10.5 г). По аналогии с индуктивным X_L и емкостным X_C сопротивлениями различают индуктивную b_L и емкостную b_C проводимости.

Если в цепи больше двух параллельных ветвей, то для рационального расчета используется метод проводимостей, который основан на следующем.

1) Ток в каждой цепи является векторной суммой активной и реактивной составляющих (рис. 10.5).

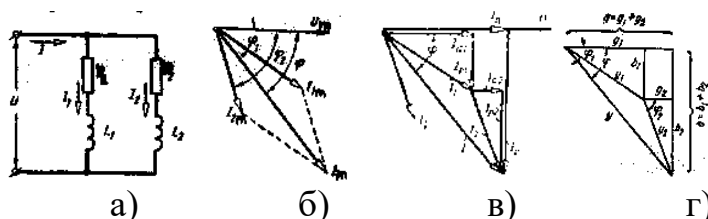


Рисунок 10.5 – Простейшая цепь переменного тока, состоящая из двух параллельных ветвей с последовательно включенными активными сопротивлениями и катушками индуктивности

Например, для рассмотренной выше цепи действующие значения то-ков в вет-
 вях можно рассчитать по следующим формулам: $I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$, $I_2 = \sqrt{I_{2a}^2 + I_{2p}^2}$.

2) Активные составляющие совпадают по фазе с напряжением и равны:

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \frac{R_1}{Z_1} = U g_1, \quad g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}, \quad I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{U}{Z_2} \frac{R_2}{Z_2} = U g_2, \quad g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2},$$

где g_1 и g_2 – активные проводимости первой и второй ветвей.

3) Реактивные составляющие токов отличаются по фазе от напряжения на $\pm \frac{\pi}{2}$

и рассчитываются по формулам: $I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \frac{X_1}{Z_1} = U b_1$, $b_1 = \frac{X_1}{Z_1^2}$,

$I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2 = \frac{U}{Z_2} \frac{X_2}{Z_2} = U b_2$, $b_2 = \frac{X_2}{Z_2^2}$, где b_1 и b_2 – реактивные проводимости первой

и второй ветвей. Тогда: $I_1 = U \sqrt{g_1^2 + b_1^2} = U y_1$, $I_2 = U \sqrt{g_2^2 + b_2^2} = U y_2$, где $y_1 = \sqrt{g_1^2 + b_1^2}$ и $y_2 = \sqrt{g_2^2 + b_2^2}$ – полные проводимости обеих ветвей.

Проводимость всей цепи может быть рассчитана по формуле представлена тре-
 угольником проводимостей (рис.3.28г), который является следствием векторной
 диаграммы токов: $y = \sqrt{g^2 + b^2}$, где $g = g_1 + g_2$ и $b = b_1 + b_2$.

4) Общая сила тока в цепи может быть рассчитана как модуль векторной суммы
 активной и реактивной составляющих $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$, где $I_a = I_{a1} + I_{a2}$ и $I_p = I_{p1} + I_{p2}$.

5) Сдвиг фаз между током и напряжением: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_p}{I_a}$ или $\cos \varphi = \frac{g}{y}$.

6) Активную, реактивную и полную мощность цепи можно рассчитать по фор-
 мулам:

$$P = UI \cos \varphi = U U y \frac{g}{y} = U^2 g,$$

$$Q = UI \sin \varphi = U U y \frac{b}{y} = U^2 b,$$

$$S = UI = U^2 y,$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

10.3 Взаимная индуктивность. Согласно, встречное включения катушек

Поток самоиндукции первой катушки Φ_1 можно разделить на два: поток рассе-
 яния Φ_{11} , сцепляющийся только с катушкой 1 и поток взаимной индукции Φ_{12} , сцеп-
 ляющийся также со второй катушкой (рис. 10.6). $\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12}$. Аналогично для вто-
 рой катушки: $\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{21}$.

Полное потокоцепление первой катушки:

$$\Psi_1 = w_1(\Phi_1 + \Phi_{21})$$

на рисунке потоки Φ_1 и Φ_2 направлены одинаково, говорят «согласно». Поэтому в скобках перед Φ_{21} стоит (+).

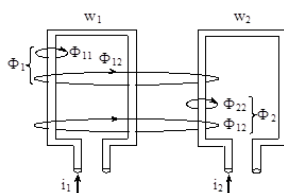


Рисунок 10.6 – Взаимосвязанные катушки

Если изменить направление тока в катушке 2, то потоки будут направлены встречно и будет знак(-). В общем случае: $\Psi_{1n} = w_1(\Phi_1 \pm \Phi_{21}) = w_1\Phi_1 \pm w_1\Phi_{21} = \Psi_1 \pm \Psi_{21}$ (+) – согласное, (-) – встречное. Ψ_1 – потокосцепление самоиндукции, Ψ_{21} – потокосцепление взаимоиндукции. Величина Ψ_1 пропорциональна i_1 :

$$\Psi_{21} = M_{21}i_2 \quad \Psi_1 = L_1i_1$$

где L_1 – индуктивность первой катушки; M_{21} – взаимная индуктивность.

Аналогично для второй катушки: $\Psi_{21} = M_{21}i_1 \quad \Psi_2 = L_2i_2$

Полная ЭДС, индуцированная в первом контуре:

$$e_{1n} = -\frac{d\Psi_{1n}}{dt} = -\frac{d(\Psi_1 \pm \Psi_{21})}{dt} = -\frac{d\Psi_1}{dt} \mp \frac{d\Psi_{21}}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt} \mp M_{21} \frac{di_2}{dt};$$

Явление наведения ЭДС в каком-либо контуре при изменении тока в другом контуре, называется взаимоиндукцией.

Наведённую ЭДС называют ЭДС взаимоиндукции и обозначают:

$$e_{m1} = \mp M_{21} \frac{di_2}{dt} \text{ – ЭДС взаимоиндукции в первой катушке,}$$

$$e_{2n} = -L_2 \frac{di_2}{dt} \mp M_{12} \frac{di_1}{dt} \text{ – ЭДС взаимоиндукции во второй катушке.}$$

В этих формулах $M_{21} = M_{12} = M$, $[M] = 1 \text{ Гн}$

Степени индуктивной связи катушки определяются с помощью коэффициентов связи:

$$K = \sqrt{\frac{\Phi_{12}\Phi_{21}}{\Phi_1\Phi_2}}$$

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}}$$

Поскольку у реальных катушек всегда существуют потоки рассеяния, то $K < 1$.

При расчёте таких цепей необходимо учитывать, как направлены потоки магнитносвязанных катушек – согласно или встречно.

Направления потоков можно определить, зная направление намотки катушек на сердечнике и направление тока в катушках (рис. 10.7).

Токи, входящие в одноимённые зажимы магнитосвязанных катушек, дают согласное направление магнитных потоков в этих катушек.

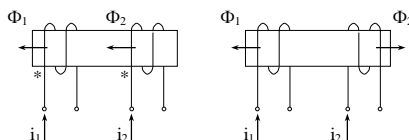


Рисунок 10.7 – Согласно, встречное включения катушек

Одноимённые зажимы помечают либо точкой, либо звёздочкой. Если на принципиальной электрической схеме токи ориентированы одинаково относительно одноимённых зажимов катушек, то это согласное включение катушек, иначе – встречное.

10.4 Коэффициент мощности

Номинальные параметры, т. е. мощность источника $S_{уст}$, мощность потребителя $P_{номр}$ и коэффициент мощности $\cos\varphi_{номр}$, связаны следующим соотношением

$$S_{уст} = \frac{P_{номр}}{\cos\varphi_{номр}}.$$

Чем меньше $\cos\varphi_{номр}$, тем большую мощность S должен иметь источник для питания этого потребителя, т. е. тем больше его габариты, вес, расход материалов, стоимость и др.

Ток в цепи потребителя с определенным $\cos\varphi_{номр}$ равен

$$I = \frac{P_{номр}}{U\cos\varphi_{номр}}$$

Чем меньше $\cos\varphi_{номр}$, тем больше ток потребителя I , тем больший ток проходит по проводам линий электропередачи, тем больше потери энергии в этой линии и меньше КПД её и всей системы.

Так как большинство потребителей представляет собой нагрузку индуктивного характера, то для улучшения $\cos\varphi_{номр}$ параллельно с ним подключаются конденсаторы. Коэффициент мощности можно повысить, увеличив активную нагрузку. При этом увеличивается потребляемая энергия, что экономически нерационально (уменьшается КПД установки).

10.5 Ток, напряжение, сопротивление и мощность в комплексном виде

Если ток и напряжение изменяются по синусоидальному закону $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, то, как указывалось выше их можно изобразить векторами и, следовательно, записать комплексными числами:

$$\dot{I} = Ie^{j\varphi_i}, \dot{U} = Ue^{j\varphi_u},$$

где \dot{I} и \dot{U} – комплексы тока и напряжения. Точка над комплексами указывает, что ток и напряжение изменяются по синусоидальному закону с определенной частотой ω ; I и U – модули комплексов тока и напряжения, они же действующие значения тока и напряжения; φ_i и φ_u – аргументы комплексов тока и напряжения, они же начальные фазы тока, φ_i и напряжения φ_u .

Комплекс полного сопротивления цепи \underline{Z} определяется отношением комплекса напряжения к комплексу тока, т. е.

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I} e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = Ze^{j\varphi}.$$

Комплексные величины, не зависящие от времени, обозначаются прописными буквами с черточкой внизу.

Модулем комплекса полного сопротивления является кажущееся сопротивление цепи $Z = U/I$, а аргументом – угол сдвига фаз между током и напряжением φ .

Алгебраическая форма записи комплекса полного сопротивления \underline{Z}

$$\underline{Z} = Ze^{j\varphi} = Z\cos\varphi + jZ\sin\varphi = R + jX.$$

Обратная величина комплекса сопротивления – комплекс проводимости $\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}$.

Любую цепь переменного тока можно рассчитывать по законам постоянного тока, если все величины представить в комплексной форме. В этом и заключается достоинство символического метода расчета.

Комплекс полной мощности цепи \underline{S} определяется произведением комплекса напряжения \underline{U} и сопряженного комплекса тока \underline{i} (над сопряженным комплексом синусоидальной величины ставят «звёздочку»)

$$\underline{S} = \underline{U}\underline{i}^* = Ue^{j0} \cdot Ie^{-j\varphi} = UIe^{-j\varphi} = Se^{-j\varphi}$$

Если комплекс полной мощности \underline{S} перевести из показательной формы в алгебраическую, то получится

$$\underline{S} = UIe^{-j\varphi} = UI\cos(-\varphi) + jUI\sin(-\varphi) = P - jQ.$$

То есть вещественная часть комплекса полной мощности – активная мощность P , а коэффициент при мнимой единице – реактивная мощность Q .

10.6 Законы Кирхгофа в комплексной форме

Первый закон Кирхгофа в комплексной форме: сумма комплексных амплитуд токов ветвей, сходящихся в узле равна нулю, т.е.

$$\sum \underline{i} = 0.$$

Поскольку каждое слагаемое в представленном выражении есть вектор, то результат есть сумма векторов. Это обстоятельство позволяет контролировать аналитические расчеты наглядными графическими построениями-векторными диаграммами.

Второй закон Кирхгофа в комплексной форме – в установившемся синусоидальном режиме сумма комплексных амплитуд ЭДС источников напряжений в контуре равна сумме комплексных амплитуд падений напряжений на элементах контура. Если контур содержит N источников напряжений и L пассивных элементов, то математически это положение формулируется следующим образом

$$\sum_{n=1}^N \underline{E}_{mn} = \sum_{l=1}^L \underline{U}_{ml}.$$

Вопросы к теме 10

1. Рассказать порядок расчета неразветвленной цепи переменного тока с произвольным количеством элементов.
2. Рассказать порядок расчета неразветвленной цепи переменного тока методом активных и реактивных составляющих токов.
3. Рассказать порядок расчета неразветвленной цепи переменного тока методом проводимостей.

4. Объяснить принцип построения векторной диаграммы неразветвленной и разветвленной цепи переменного тока

5. Записать формулы для вычисления синусоидальных токов и напряжений комплексными числами.

6. Записать формулы для вычисления сопротивления и проводимости комплексными числами.

7. Записать формулу для вычисления мощности комплексным числом. Привести формулу для вычисления мощности в комплексном виде.

8. Записать формулы закона Ома и законов Кирхгофа в комплексной форме.

9. Рассказать порядок расчета цепей переменного тока символическим методом

10. Рассказать, какие методы расчета цепей постоянного тока можно применить к расчету цепей переменного тока.

ТЕМА 11 ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

11.1 Основные понятия

Многофазная цепь – это цепь, имеющая несколько ЭДС одинаковой частоты, сдвинутых друг относительно друга по фазе.

Электрическая цепь переменного тока, в которой действует 3 ЭДС, называется трехфазной электрической цепью

Трёхфазная система электрических цепей – это совокупность трех электрических цепей, в которых действуют три синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, создаваемые общим источником энергии и сдвинутые по фазе одна относительно другой на угол 120° .

Источником электроэнергии в трехфазной системе является трехфазный генератор, вырабатывающий три ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые по фазе на угол 120° . На рисунке 11.1 приведена упрощенная схема такого генератора.

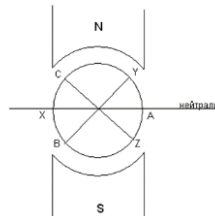


Рисунок 11.1 – Модель трехфазной системы

Приняв за начало отсчета времени ($t=0$) начало периода ЭДС в каждой обмотке:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t, \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ), \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned}$$

Изобразим соответствующие синусоиды ЭДС и векторную диаграмму ЭДС (рис 11.2).

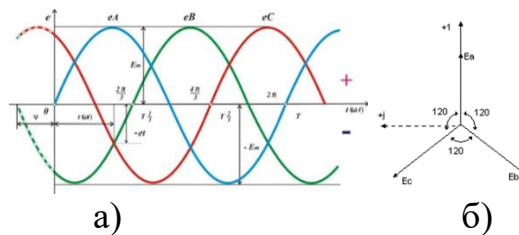


Рисунок 11.2 – Синусоиды ЭДС(а) и векторные диаграммы ЭДС(б)

Достоинства трехфазных цепей в сравнении с однофазными:

- 1) При прочих равных условиях трехфазный генератор дешевле, легче и экономичнее, чем три однофазных генератора с такой же мощностью.
- 2) Трехфазная система токов позволяет получить вращающееся магнитное поле, на котором основана работа трехфазных двигателей.
- 3) Суммарная мгновенная мощность трехфазного двигателя постоянная, что обеспечивает на валу двигателя постоянный вращающийся момент.

11.2 Соединение обмоток генератора звездой

При соединении обмоток генератора звездой концы обмоток X, Y и Z электрически соединяются в одну точку 0 (рис. 11.3 а), которая называется нулевой,

или нейтральной. При этом генератор с потребителем соединяется тремя или четырьмя проводами.

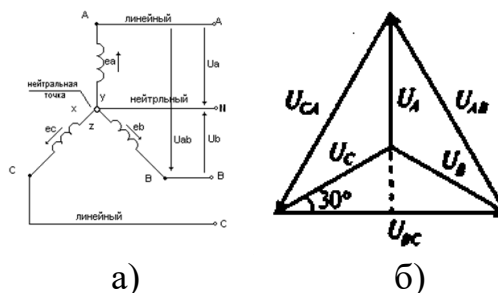


Рисунок 11.3 – Соединение обмоток генератора звездой

Провода, соединяющие источник электрической энергии с приемником, называются линейными.

Токи, протекающие по линейным проводам, называются линейными токами (токи I_A , I_B и I_C (рис.11.3) – линейные).

Токи, протекающие по фазам приемника, называются фазными токами (токи I_a , I_b и I_c . (рис. 11.3) – фазные).

Так как обмотка генератора, линейный провод и потребитель, принадлежащие одной фазе, соединены последовательно, то при соединении «звездой» линейный ток равен фазному;

$$I_A = I_a; I_B = I_b; I_C = I_c$$

или в общем случае

$$I_l = I_\phi$$

Токи в каждой фазе приемника протекают от начала фазы к ее концу, т. е. к нейтральной точке n , и при наличии нейтрального провода на основании первого закона Кирхгофа можно записать:

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

т. е. ток в нейтральном проводе равен геометрической сумме фазных токов.

Напряжения между линейными проводами называются линейными напряжениями. Напряжения U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} – линейные. Условные положительные направления линейных напряжений приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам, соответствующим второму индексу.

Напряжение между началом и концом фазы называется фазным напряжением. Напряжения U_{an} , U_{bn} и U_{cn} – фазные напряжения.

Учитывая положительные направления фазных токов, линейные напряжения со стороны приемника определяются выражениями

$$\begin{aligned} \bar{U}_{ab} &= \bar{U}_b - \bar{U}_a, \\ \bar{U}_{bc} &= \bar{U}_c - \bar{U}_b, \\ \bar{U}_{ca} &= \bar{U}_a - \bar{U}_c, \end{aligned}$$

Итак, действующее значение линейных напряжений равно векторной разности соответствующих фазных напряжений.

Соотношение между действующими значениями фазных и линейных напряжений можно определить из векторной диаграммы напряжений. При этом $U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_l = \sqrt{3}U_\phi$.

11.3 Расчет симметричной трехфазной цепи

Расчет симметричной трехфазной цепи осуществляется одинаково как для четырех-, так и для трехпроводной системы, так как при симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе равен нулю и поэтому необходимость в нейтральном проводе отпадает. Требуется определить фазные и линейные токи, активную, реактивную и полную мощность цепи. Расчет такой цепи проводится для одной фазы путем определения:

- фазного напряжения по формуле $U_{\phi} = U_{л}/\sqrt{3}$;
- эквивалентного активного сопротивления R_{ϕ} в фазе приемника, если фазная нагрузка содержит более одного активного сопротивления. Формула для определения значения R_{ϕ} зависит от способа соединения активных сопротивлений;
- эквивалентного реактивного сопротивления X_{ϕ} в фазе приемника, если фазная нагрузка содержит более одного реактивного сопротивления. Формула для определения значения X_{ϕ} зависит от способа соединения реактивных сопротивлений и от их характера — индуктивного или емкостного;
- полного сопротивления фазной нагрузки по формуле $Z_{\phi} = \sqrt{R_{\phi}^2 + X_{\phi}^2}$;
- тока в фазе приемника по формуле $I_{\phi} = U_{\phi}/Z_{\phi}$. При соединении «звездой» фазные и линейные токи равны;
- активной, реактивной и полной мощности, потребляемой фазной нагрузкой по формулам

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \frac{R_{\phi}}{Z_{\phi}}$$

$$Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \frac{X_{\phi}}{Z_{\phi}}; S_{\phi} = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

- активной, реактивной и полной мощности, потребляемой всей нагрузкой. Так как нагрузка симметрична, то полученные значения P_{ϕ} , Q_{ϕ} и S_{ϕ} следует умножить на 3: $P = 3P_{\phi}$; $Q = 3Q_{\phi}$; $S = 3S_{\phi}$

11.4 Расчет несимметричной трехфазной цепи

Расчет несимметричной трехфазной цепи производится различными методами в зависимости от наличия или отсутствия нейтрального провода. При наличии нейтрального провода расчет осуществляется в той же последовательности, что и для цепи с симметричной нагрузкой, с той лишь разницей, что фазные сопротивления, фазные токи, активные и реактивные мощности вычисляются для каждой фазы отдельно:

$$Z_a = \sqrt{R_a^2 + X_b^2}; Z_b = \sqrt{R_b^2 + X_b^2}; Z_c = \sqrt{R_c^2 + X_c^2};$$

$$I_a = \frac{U_{\phi}}{Z_a}; I_b = \frac{U_{\phi}}{Z_b}; I_c = \frac{U_{\phi}}{Z_c};$$

$$P_a = U_a I_a \frac{R_a}{Z_a}; P_b = U_b I_b \frac{R_b}{Z_b}; P_c = U_c I_c \frac{R_c}{Z_c}; P = P_a + P_b + P_c;$$

$$Q_a = U_a I_a \frac{X_a}{Z_a}; Q_b = U_b I_b \frac{X_b}{Z_b}; Q_c = U_c I_c \frac{X_c}{Z_c}$$

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c; S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

При необходимости можно определить значения полной мощности, потребляемой в каждой фазе приемника, и другие параметры, например, падения напряжений на отдельных участках фазной цепи и т.п.

Ток в нейтральном проводе определяется как векторная сумма фазных токов из векторной диаграммы.

11.5 Расчёт несимметричной звезды графоаналитическим методом

Определить фазные токи и ток в нулевом проводе, если задано Z_A, Z_B, Z_C, U_L .

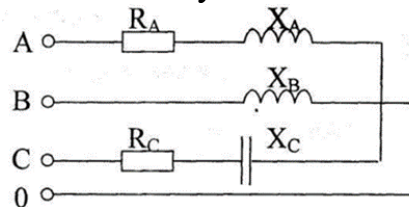
Пример

Дано:

$$U_L = 346 \text{ В}, Z_A = 8 + j6, Z_B = j10, Z_C = 3 - j4, I_A, I_B, I_C, I_N, P - ?$$

Решение

Составляем по исходным данным схему цепи



1. Определить полные сопротивления фаз приёмника:

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ Ом}$$

$$Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} = \sqrt{0 + 10^2} = 10 \text{ Ом}$$

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ Ом}$$

2. Определить фазные напряжения: $U_\phi = U_L / \sqrt{3} = 346 / 1,73 = 200 \text{ В}$

3. Определить токи фаз:

$$I_A = U_\phi / Z_A = 200 / 10 = 20 \text{ А}$$

$$I_B = U_\phi / Z_B = 200 / 10 = 20 \text{ А}$$

$$I_C = U_\phi / Z_C = 200 / 5 = 40 \text{ А}$$

4. Определить фазовые сдвиги между токами и напряжениями:

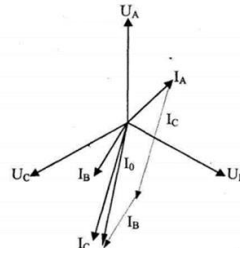
$$\varphi_A = \arccos \varphi_A = R_A / Z_A = \arccos 8 / 10 = 37^\circ, \text{ нагрузка } R$$

$$\varphi_B = \arccos \varphi_B = R_B / Z_B = \arccos 0 / 10 = 90^\circ, \text{ нагрузка индуктивная}$$

$$\varphi_C = \arccos \varphi_C = R_C / Z_C = \arccos 3 / 5 = 53^\circ \text{ нагрузка } R\text{-}C$$

5. Определить ток в нейтральном проводе с помощью векторной диаграммы: строим вектора фазных напряжений $m_u = 100 \text{ В/См}$, строим вектора фазных токов $m_i = 10 \text{ А/См}$, строим вектор тока в нулевом проводе: $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$

Из диаграммы получим $\dot{I}_N = 38 \text{ А}$



6. Определить мощность, потребляемую данными приёмниками:

$$P_A = I_A^2 \times R_A = 20^2 \times 8 = 3200 \text{ Вт}$$

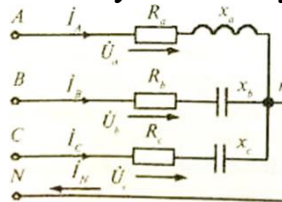
$$P_B = I_B^2 \times R_B = 20^2 \times 0 = 0$$

$$P_C = I_C^2 \times R_C = 40^2 \times 3 = 4800 \text{ Вт}$$

$$P = P_A + P_B + P_C = 3200 + 0 + 4800 = 8000 \text{ Вт}$$

11.6 Расчёт несимметричной звезды символическим методом

На рисунке представлена схема трехфазного несимметричного приемника, у которого: $R_a = 30 \text{ Ом}$; $x_a = 40 \text{ Ом}$; $R_b = 40 \text{ Ом}$; $x_b = 30 \text{ Ом}$; $R_c = 60 \text{ Ом}$; $x_c = 60 \text{ Ом}$ Линейное напряжение источника $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$. Определить токи в фазах и в нейтральном проводе, активную, реактивную и полную мощности приемника.



1. Определить фазное напряжение приемника

$$U_{\phi} = U_{\text{л}} / \sqrt{3} = 380 / 1,73 = 220 \text{ (В)}.$$

2. Фазные напряжения в комплексной форме будут равны:

$$U_a = 220 \text{ В}; U_b = 220e^{-j120^\circ} \text{ В}; U_c = 220e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

3. Определить сопротивления в фазах приемника, Ом:

$$\underline{Z}_a = R_a + jx_a = 30 + j40 = 50e^{j53,1^\circ};$$

$$\underline{Z}_b = R_b - jx_b = 40 - j30 = 50e^{-36,9^\circ};$$

$$\underline{Z}_c = R_c - jx_c = 60 - j60 = 84,85e^{-j45^\circ};$$

4. Токи в фазах приемника:

$$I_a = \frac{U_a}{\underline{Z}_a} = \frac{220e^{j0^\circ}}{50e^{j53,1^\circ}} = 4,4e^{-j53,1^\circ} = 2,63 - j3,53;$$

$$I_b = \frac{U_b}{\underline{Z}_b} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{50e^{-j36,9^\circ}} = 4,4e^{-j83,1^\circ} = 0,53 - j4,37;$$

$$I_c = \frac{U_c}{\underline{Z}_c} = \frac{220e^{j120^\circ}}{84,85e^{-j45^\circ}} = 2,59e^{j165^\circ} = -2,5 - j0,67.$$

5. Ток в нейтральном проводе:

$$I_N = I_a + I_b + I_c = 2,63 - j3,52 + 0,53 - j4,37 - 2,5 - j0,65 = 0,66 - j8,55 = 8,58e^{-j85,6^\circ} \text{ (А)}.$$

6. Мощности в фазах приемника:

$$P_a = I^2 R_a = 4,4^2 \cdot 30 = 580,8 \text{ (Вт)};$$

$$P_b = I^2 R_b = 4,4^2 \cdot 40 = 774,4 \text{ (Вт)};$$

$$\begin{aligned}
P_c &= I^2 R_c = 2,59^2 \cdot 60 = 402,49 \text{ (Вт)}; \\
Q_a &= I^2 x_a = 4,4^2 \cdot 40 = 774,4 \text{ (ВТ)}; \\
Q_b &= I^2 x_b = 4,4^2 \cdot 30 = 580,8 \text{ (ВТ)}; \\
Q_c &= -I^2 x_c = 2,59^2 \cdot 60 = 402,49 \text{ (ВТ)}; \\
\underline{S}_a &= U_a I_a = 220 \cdot 4,4 e^{j53,1^\circ} = 96 e^{j53,1^\circ} = P_a + jQ_a = 581,21 + j774,09 \text{ (В} \cdot \text{А)}; \\
\underline{S}_b &= U_b I_b = 220 e^{-j120^\circ} \cdot 4,4 e^{j83,1^\circ} = 96 e^{-j203,1^\circ} = P_c - jQ_c \\
&= 774,09 - j581,21 \text{ (В} \cdot \text{А)}; \\
\underline{S}_c &= U_c I_c = 220 e^{j120^\circ} \cdot 2,59 e^{-j165^\circ} = 569,8 e^{-45^\circ} = P_c - jQ_c \\
&= 402,91 - j402,91 \text{ (В} \cdot \text{А)}.
\end{aligned}$$

7. Активная, реактивная и полная мощности приемника:

$$\begin{aligned}
P &= P_a + P_b + P_c = 580,8 + 774,4 + 402,49 = 1757,69 \text{ (Вт)}; \\
Q &= Q_a + Q_b + Q_c = 774,4 - 580,8 - 402,49 = -208,89 \text{ (вар)}; \\
\underline{S} &= \underline{S}_a + \underline{S}_b + \underline{S}_c = 581,21 + j774,09 + 774,09 - j581,21 + 402,91 - j402,91 \\
&= 1758,21 - j210,03 \text{ (В} \cdot \text{А)}.
\end{aligned}$$

Баланс мощностей выполняется, следовательно задача решена верно.

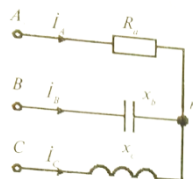
При отсутствии нейтрального провода напряжения на фазах приемника U_a , U_b и U_c неодинаковы из-за наличия напряжения смещения нейтрали U_N . Разность между фазными напряжениями приемника пропорциональна величине смещения нейтрали. Расчет трехфазной цепи в этом случае выполняется в следующем порядке:

- фазные напряжения источника задаются в символической форме;
- определяются фазные сопротивления приемника и результаты записываются в символической форме;
- вычисляется значение смещения нейтрали;
- вычисляются фазные напряжения приемника;
- вычисляются токи в фазной нагрузке.

Пример

На рисунке представлена схема несимметричного приемника, подключенного к источнику трехфазного напряжения без нейтрального провода.

Даны: линейное напряжение источник $U_L = 380 \text{ В}$; сопротивление в фазах приемника $R_a = x_b = x_c = 22 \text{ Ом}$. Определить токи.



Решение

1. Определить фазные напряжения источника

$$U_\phi = U_L / \sqrt{3} = 380 / 1,73 = 220 \text{ (В)}.$$

Фазные напряжения источника в символической форме:

$$U_A = 220 \text{ В}; U_B = 220 e^{-j120^\circ} = -110 - j191 \text{ В};$$

$$U_C = 220 e^{j120^\circ} = -110 + j191 \text{ В}.$$

2. Определить сопротивления в фазах приемника:

$$\underline{Z}_a = 22 \text{ Ом}; \underline{Z}_b = j22 \text{ Ом}; \underline{Z}_c = -j22 \text{ Ом}.$$

3. Определить напряжение между нейтральными точками источника и приемника (смещение нейтрали):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{nN} &= \frac{\dot{U}_A \dot{Y}_A + \dot{U}_B \dot{Y}_B + \dot{U}_C \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C} \\ &= \frac{1/22 \cdot 220 + j1/22(-110 - j191) - j1/22(-110 + j191)}{1/22 + j1/22 - j1/22} = 602 \text{ (В)}. \end{aligned}$$

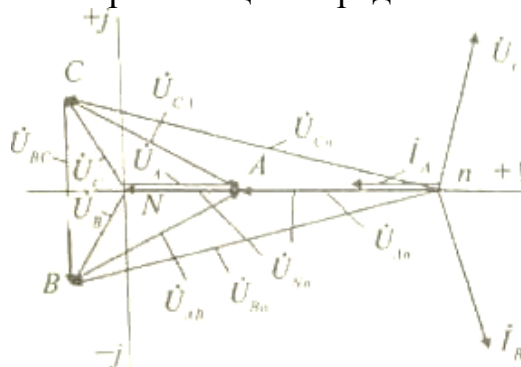
4. Определить напряжения в фазах приемника, В:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} &= 220 - 602 = -382; \\ \dot{U}_{Bn} &= -110 - j191 - 602 = -712 - j191; \\ \dot{U}_{Cn} &= -110 + j191 - 602 = -712 + j191; \end{aligned}$$

5. Фазные токи, А:

$$\begin{aligned} \dot{i}_A &= \frac{\dot{U}_{An}}{\underline{Z}_A} = \frac{-382}{22} = -17,3; \\ \dot{i}_B &= \frac{\dot{U}_{Bn}}{\underline{Z}_B} = \frac{-712 - j191}{-j22} = 8,68 - j32,4; \\ \dot{i}_C &= \frac{\dot{U}_{Cn}}{\underline{Z}_C} = \frac{-712 + j191}{j22} = 8,68 + j32,4; \end{aligned}$$

Векторная диаграмма рассмотренной цепи представлена на рисунке:



11.7 Роль нулевого провода

Нулевой провод является уравнивающим. Потенциалы нейтрали источника и приемника с помощью этого провода принудительно уравниваются, а поэтому звезда векторов фазных напряжений приёмника точно совпадает со звездой фазных напряжений источника.

Четырехпроводная система применяется в электрических сетях с напряжением 380/220В при электроснабжении от общего источника силовой (электродвигатели) и осветительной (электrolампы) нагрузки.

При несимметричной нагрузке обрыв нулевого провода ($Z_N = \infty$) вызывает значительное изменение токов и фазных напряжений, что в большинстве случаев недопустимо. Поэтому в нулевой провод предохранители не устанавливаются.

11.8 Соединение обмоток генератора и потребителей энергии «треугольником»

При соединении фазных обмоток трехфазного источника или приемника электрической энергии по схеме «треугольник» конец K_1 первой фазы AB соединяется с

началом H_2 второй фазы BC (рис. 11.4), конец K_2 второй фазы соединяется с началом H_3 третьей фазы CA и конец K_3 третьей фазы — с началом первой фазы AB . Три линейных провода $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$, соединяющих источник электрической энергии с приемником, подключаются к началам фаз.

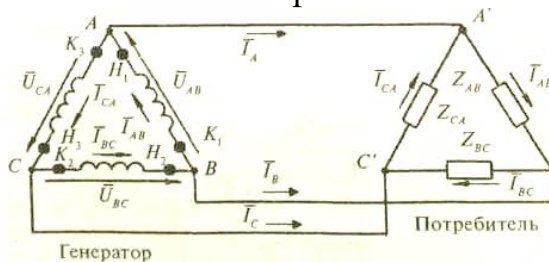


Рисунок 11.4 – Соединение обмоток генератора и нагрузки приемника «треугольником»

При соединении треугольником между фазным и линейным напряжением имеет место соотношение

$$U_{\phi} = U_{л}$$

т. е. при соединении обмоток источника или фазных нагрузок приемника «треугольником» фазные напряжения U_{ϕ} равным линейным $U_{л}$ и не зависят от сопротивлений Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA} фаз нагрузки.

На основании первого закона Кирхгофа для узловых точек A', B' и C' можно составить уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}, \end{aligned}$$

откуда следует, что в общем случае при соединении «треугольником» ток в линейном проводе равен векторной разности двух соответствующих фазных токов.

На рисунке 11.5 приведена векторная диаграмма напряжений и токов трехфазного симметричного приемника с активно индуктивной нагрузкой, соединенного по схеме «треугольник». Если векторная диаграмма построена в масштабе, то линейные токи могут быть определены путем измерения величины соответствующих векторов.

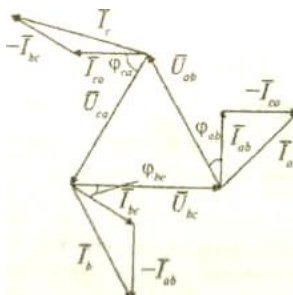


Рисунок 11.5 – Векторная диаграмма токов и напряжений симметричного, соединенного «треугольником» трехфазного приемника

При симметричной нагрузке фазные токи одинаковы и сдвинуты по фазе на угол 120° относительно друг друга. При равномерной нагрузке линейный ток в $\sqrt{3}$ раз больше фазного тока:

$$I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}$$

11.9 Мощность трёхфазного тока

Активная мощность, отдаваемая трехфазным генератором и потребляемая трехфазным потребителем, определяется суммой активных мощностей каждой фазы потребителя:

$$P = P_A + P_B + P_C = U_{\phi A} I_{\phi A} \cos \varphi_A + U_{\phi B} I_{\phi B} \cos \varphi_B + U_{\phi C} I_{\phi C} \cos \varphi_C$$

Аналогичное определение можно отнести и к реактивной мощности трёхфазного тока, т. е.

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_{\phi A} I_{\phi A} \sin \varphi_A + U_{\phi B} I_{\phi B} \sin \varphi_B + U_{\phi C} I_{\phi C} \sin \varphi_C$$

Полная, или кажущаяся, мощность трёхфазного потребителя равна

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Очевидно, что при равномерной нагрузке фаз $U_{\phi A} = U_{\phi B} = U_{\phi C}$ и $I_{\phi A} = I_{\phi B} = I_{\phi C}$ активная мощность трёхфазного тока утроенному значению активной мощности каждой фазы

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}$$

Однако на практике удобнее оперировать линейными величинами, так как доступными являются линейные провода, а не обмотки генератора или двигателя.

При соединении потребителя звездой при равномерной нагрузке фаз

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}, \text{ а } I_{\phi} = I_{\text{л}}$$

$$\text{Тогда } P = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = 3 \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} I_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi$$

При соединении потребителей треугольником при равномерной нагрузке фаз

$$U_{\phi} = U_{\text{л}}, \text{ а } I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$$

$$\text{Тогда } P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = 3 \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} U_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi$$

Таким образом, при равномерной нагрузке фаз при соединении потребителей звездой и треугольником мощности трёхфазного тока определяются выражениями:

$$\text{активная мощность } P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi$$

$$\text{реактивная мощность } Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi$$

$$\text{полная, или кажущаяся, мощность } S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}}$$

$$\text{или при неравномерной нагрузке } S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

При неравномерной нагрузке фаз полная, или кажущаяся, мощность трёхфазного тока может быть определена суммой полных мощностей каждой фазы, выраженной в комплексной форме, а именно $\underline{S} = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C$

11.10 Расчёт несимметричного треугольника

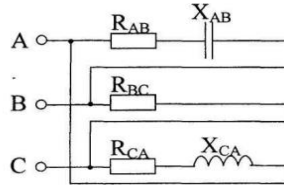
Трёхфазный потребитель соединён в треугольник и включен под фазное напряжение U_{ϕ} . Сопротивления фаз потребителя $\underline{Z}_{AB}, \underline{Z}_{BC}, \underline{Z}_{CA}$. Определить: Фазные токи; Линейные токи; Мощности; Построить векторную диаграмму.

Пример

Дано: $U_{\text{л}} = 200\text{В}$, $\underline{Z}_{AB} = 16 - j12$, $\underline{Z}_{BC} = 10$ Ом, $\underline{Z}_{CA} = 6 + j8$. $I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}, P - ?$

1. Выписать исходные данные.
2. Составить схему цепи.
3. Рассчитать несимметричный треугольник:
 - 1) Записать напряжения на фазах потребителя в комплексной форме;
 - 2) Определить фазные токи I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} ;
 - 3) Определить линейные токи I_A, I_B, I_C ;
 - 4) Определить мощности P, Q, S .

Решение



Фазные напряжения в комплексной форме:

$$\dot{U}_{AB} = U_\phi = 200B.$$

$$\dot{U}_{BC} = U_\phi \times \angle -0,5 - j0,87 = 200 \times \angle -0,5 - j0,87 = -100 - j174B$$

$$\dot{U}_{CA} = U_\phi \times \angle 0,5 + j0,87 = 200 \times \angle 0,5 + j0,87 = -100 + j174B$$

Фазные токи:

$$\dot{i}_{AB} = \dot{U}_{AB} / \underline{Z}_{AB} = \frac{200}{16 - j12} = \frac{200 \times \angle 6 + j12}{16^2 + 12^2} = \frac{3200 + j2400}{400} = 8 + j6$$

$$\dot{i}_{BC} = \dot{U}_{BC} / \underline{Z}_{BC} = \frac{-100 - j174}{10} = -10 - j17,4,$$

$$\dot{i}_{CA} = \dot{U}_{CA} / \underline{Z}_{CA} = \frac{-100 + j174}{6 + j8} = \frac{\angle 100 + j174 \times \angle -j8}{6^2 + 8^2} = 7,92 + j18,44$$

Линейные токи:

$$\dot{i}_A = \dot{i}_{AB} - \dot{i}_{CA} = 8 + j6 - 7,92 - j18,44 = 0,08 - j12,44$$

$$\dot{i}_B = \dot{i}_{BC} - \dot{i}_{AB} = -10 - j17,4 - 8 - j6 = -18 - j23,4,$$

$$\dot{i}_C = \dot{i}_{CA} - \dot{i}_{BC} = 7,92 + j18,44 + 10 + j17,4 = 18 + j35,84$$

Мощности:

$$\tilde{S}_{AB} = \dot{U}_{AB} \times \dot{i}_{AB}^* = 200 \times \angle -j6 = 1600 - j1200, \quad P_{AB} = 1600Bm \text{ и } Q_{AB} = 1200BAp \text{ нагрузка активно-ёмкостная}$$

$$\tilde{S}_{BC} = \dot{U}_{BC} \times \dot{i}_{BC}^* = \angle 100 - j174 \times \angle 10 + j17,4 = 4028,$$

$$P_{BC} = 4028Bm \text{ и } Q_{BC} = 0BAp \text{ нагрузка активная}$$

$$\tilde{S}_{CA} = \dot{U}_{CA} \times \dot{i}_{CA}^* = \angle 100 + j174 \times \angle 92 - j18,44 = 2417 + j322$$

$$P_{CA} = 2417Bm \text{ и } Q_{CA} = 3222BAp \text{ нагрузка активно - индуктивная}$$

Действующие значения фазных и линейных токов определяются по теореме Пифагора по соответствующим комплексным значениям:

$$I_{AB} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ A.}$$

$$I_{BC} = \sqrt{10^2 + 17,4^2} = 20 \text{ A.}$$

$$I_{CA} = \sqrt{7,92^2 + 18,44^2} = 20 \text{ A.}$$

$$I_A = \sqrt{0,08^2 + 12,44^2} = 12,44 \text{ A.}$$

$$I_B = \sqrt{18^2 + 23,4^2} = 30,5 \text{ A.}$$

$$I_C = \sqrt{18^2 + 35.84^2} = 40.85 \text{ A.}$$

Проверка мощностей с учётом полученных действующих значений:

$$P_{AB} = I_{AB}^2 \times R_{AB} = 10^2 \times 16 = 1600 \text{ Вт}$$

$$Q_{AB} = I_{AB}^2 \times X_{AB} = 10^2 \times 12 = 1200 \text{ Вар}$$

$$P_{BC} = I_{BC}^2 \times R_{BC} = 20^2 \times 10 = 4000 \text{ Вт}$$

$$Q_{BC} = I_{BC}^2 \times X_{BC} = 20^2 \times 0 = 0 \text{ Вар}$$

$$P_{CA} = I_{CA}^2 \times R_{CA} = 20^2 \times 6 = 2400 \text{ Вт}$$

$$Q_{CA} = I_{CA}^2 \times X_{CA} = 20^2 \times 8 = 3200 \text{ Вар}$$

Погрешность вычислений находится в пределах допустимых знаний.

Вопросы к теме 11

1. Сформулировать понятие трехфазной системы электрической цепи.
2. Назвать отличие трехфазной системы от однофазной электрической цепи.
3. Рассказать о трехфазной электрической цепи при соединении обмоток приемника звездой и нарисовать схему соединения. Записать соотношение между фазным и линейным током, фазным и линейным напряжением.
4. Рассказать о трехфазной электрической цепи при соединении обмоток приемника треугольником и нарисовать схему соединения. Записать соотношение между фазным и линейным током, фазным и линейным напряжением.
5. Сформулировать понятия симметричной и несимметричной нагрузки в трехфазной цепи, четырехпроводной трехфазной системе. Объяснить роль нейтрального провода.
6. Объяснить получение вращающегося магнитного поля посредством трехфазной системы токов.

ТЕМА 12 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМИ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ТОКАМИ

12.1 Основные понятия

Периодическими несинусоидальными токами называют токи, изменяющиеся в времени по периодическому несинусоидальному закону. Несинусоидальные токи возникают при различных режимах работы электрических цепей. Таких режимов четыре.

1. Источник электрической энергии вырабатывает несинусоидальную ЭДС или несинусоидальный ток, а все элементы цепи (активные сопротивления, индуктивности и ёмкости) линейны, т.е. от величины тока не зависят.

2. Источник электрической энергии вырабатывает синусоидальную ЭДС, но один или несколько элементов цепи нелинейны, т.е. имеют нелинейные характеристики (катушки со стальным сердечником, выпрямители).

3. Источник электрической энергии вырабатывает несинусоидальную ЭДС, ЭДС, а в электрическую цепь входит одно или несколько нелинейных сопротивлений.

4. Источник электрической энергии вырабатывает постоянную или синусоидальную ЭДС, а один или несколько элементов цепей в процессе работы изменяют свои параметры.

Гармоники

При рассмотрении периодических несинусоидальных колебаний можно воспользоваться теоремой Фурье, согласно которой любая периодически изменяющаяся величина может быть представлена в виде суммы постоянной составляющей и ряда синусоидальных составляющих с кратными частотами.

Синусоидальные составляющие несинусоидальных колебаний называются гармониками.

Синусоидальная составляющая, частота которой равна частоте несинусоидальной периодической величины, называется основной, или первичной, гармоникой. А синусоидальные составляющие, частоты которых в 2, 3, ..., k раз больше частоты несинусоидальной величины, называются соответственно 2-й, 3-й, ..., k -й гармоникой.

Аналитическое выражение несинусоидальной функции можно записать так:

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \psi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \psi_2) + A_3 \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots + A_k \sin(k\omega t + \psi_k)$$

где $f(\omega t)$ – несинусоидальная величина, изменяющаяся с частотой ω . A_0 – постоянная составляющая несинусоидальной величины; $A_1; A_2; A_3; \dots; A_k$ – амплитуды соответственно 1-й, 2-й, 3-й, k -й, гармоник, т.е. синусоидальных составляющих с частотой $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots, k\omega$, $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_k$ – начальные фазы соответственно 1-й, 2-й, 3-й и k -й гармоник.

Гармоники можно преобразовать, применив из тригонометрии формулу синуса суммы углов. k -ю гармонику можно представить в виде

$$A_k \sin(k\omega t + \psi_k) = A_k \sin k\omega t \cdot \cos \psi_k + A_k \cos k\omega t \cdot \sin \psi_k$$

Обозначив постоянные величины выражения можно получить

$$A_k \sin(k\omega t + \psi_k) = B_k \sin k\omega t + C_k \cos k\omega t$$

Тогда ряд Фурье для несинусоидальной периодической функции, примет вид

$$f(\omega t) = A_0 + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + B_3 \sin 3\omega t + B_k \sin k\omega t + C_1 \cos \omega t + C_2 \cos 2\omega t + C_3 \cos 3\omega t + C_k \cos k\omega t.$$

В отличие от амплитуды k -й гармоники A_k , постоянные величины B_k и C_k могут быть положительными или отрицательными. Такая запись характерна тем, что гармоники составляются ряд синусов и ряд косинусов с начальными фазами, равными нулю ($\psi_k=0$).

Свойства периодических кривых

Несинусоидальные периодические кривые, с которыми приходится встречаться в электротехнике, являются симметричными относительно оси абсцисс или ординат или начала координат.

Периодическая кривая называется симметричной относительно абсцисс, если на расстоянии половины периода они имеют ординаты, одинаковые по величине, но обратные по знаку (рис. 12.1 а), т.е. отрицательная полуволна такой кривой представляет собой зеркальное изображение положительной полуволны. Кривые симметричные относительно оси абсцисс, не содержат постоянной составляющей и четных гармоник. Такая кривая содержит только нечётные гармоники:

$$f(\omega t) = A_1 \sin(\omega t + \psi_1) + A_3 \sin(3\omega t + \psi_3) + A_5 \sin(5\omega t + \psi_5)$$

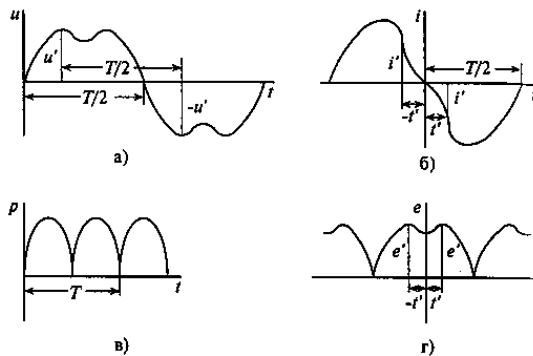


Рисунок 12.1 – Кривые несинусоидальных величин

Кривые, симметричные относительно начала координат, не содержат постоянной составляющей и косинусов. Такая кривая содержит только синусоиды (рис. 12.1 б):

$$f(\omega t) = B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + B_3 \sin 3\omega t + B_k \sin k\omega t$$

Кривая, симметричная относительно оси ординат, изображена на рисунке 12.1 г. Такая кривая не содержит синусов. Она содержит постоянную составляющую и косинусоиды:

$$f(\omega t) = A_0 + C_1 \cos \omega t + C_2 \cos 2\omega t + C_3 \cos 3\omega t + \dots$$

12.2 Несинусоидальный ток в линейных электрических цепях

Если к линейной цепи приложено несинусоидальное напряжение, которое раскладывается на ряд гармоник, то ток в этой цепи раскладывается на такое же количество тех же гармоник.

Если, например, к неразветвлённой цепи, состоящей из R , L и C (рис. 12.2), приложено несинусоидальное напряжение

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

то сопротивление этой линейной цепи для различных гармоник имеет различные значения.

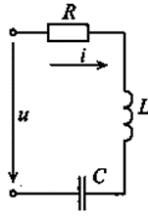


Рисунок 12.2 – Неразветвлённая цепь, состоящей из R , L и C , с приложенным несинусоидальным напряжением

Активное сопротивление R для всех гармоник одинаковое, если пренебречь поверхностным эффектом. Индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$ с увеличением номера гармоники увеличивается, так как увеличивается ω , и для любой гармоники может быть определено выражением: $X_{Lk} = k \omega L = k X_L$, где k – номер гармоники; X_{L1} – индуктивное сопротивление первой гармоники.

Емкостное сопротивление $X_c = \frac{1}{\omega C}$ с увеличением номера гармоник уменьшается и для любой гармоники определяется выражением: $X_{ck} = \frac{1}{k \omega C} = \frac{X_{c1}}{k}$, где k – номер гармоники; X_{c1} – ёмкостное сопротивление первой гармоники.

Полное сопротивление неразветвлённой линейной цепи для любой гармоники

$$Z_k = \sqrt{R^2 + (X_{Lk} - X_{ck})^2}$$

Угол сдвига фаз между током и напряжением для любой гармоники

$$\varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R} = \arctg \frac{X_{Lk} - X_{ck}}{R}$$

Очевидно, угол сдвига фаз φ может быть положительным или отрицательным в зависимости от характера цепи для определённой гармоники $X_L > X_C$ или $X_L < X_C$

Амплитуды токов для каждой гармоники равны: $I_{mk} = \frac{U_{mk}}{Z_k}$

Мгновенное значение несинусоидального тока в линейной цепи с заданным несинусоидальным напряжением U определяется выражением

$$i = I_{m1} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_1) + I_{m3} \sin(3\omega t + \psi_3 - \varphi_3) + I_{m5} \sin(5\omega t + \psi_5 - \varphi_5)$$

Если в неразветвлённой цепи включен конденсатор, а в приложенном к этой цепи несинусоидальном напряжении имеется постоянная составляющая, то ток постоянной составляющей равен нулю, так как для постоянной составляющей конденсатор представляет разрыв цепи.

Если задан несинусоидальный ток в линейной цепи и k -я гармоника тока записана: $i_k = I_{mk} \sin(\omega t + \psi_k)$, то напряжение в цепи, соответствующее этой гармонике, равно: $u_k = U_{mk} \sin(k \omega t + \psi_k + \varphi_k)$

12.3 Действующее значение несинусоидальной величины.

Мощность несинусоидального тока

Действующим называют значение несинусоидального тока, эквивалентное постоянному току по тепловому действию. При этом нужно учесть, что несинусоидальный ток складывается из постоянной составляющей и ряда гармоник:

$$i = I_0 + i_1 + i_2 + i_3 + \dots = I_0 + I_{m1} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{m2} \sin(2\omega t + \psi_2) + I_{m3} \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots$$

Для определения действующих значений тока гармоник и постоянной составляющей несинусоидального тока можно использовать формулу

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2}$$

где I_0 – постоянная составляющая несинусоидального тока; I_1, I_2, I_k – действующее значение токов гармоник, т. е. $I_k = \frac{I_{mk}}{\sqrt{2}}$

Аналогично действующее значение несинусоидального напряжения определяется выражением

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_k^2}$$

Действующее значение несинусоидального напряжения является средней квадратичной величиной постоянной составляющей и действующих значений напряжений гармоник.

Под активной мощностью P несинусоидального тока понимают среднее значение мгновенной мощности за период.

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_k = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_k I_k \cos \varphi_k$$

где P_0 – мощность постоянной составляющей несинусоидального тока; P_1, P_2, P_k – активные мощности гармоник несинусоидального тока.

Таким образом, потребляемая, т. е. активная, мощность в цепи несинусоидального тока определяется суммой постоянной мощности и активных мощностей гармоник.

Реактивная мощность в цепи несинусоидального тока, по аналогии, определяется выражением

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_k = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + \dots + U_k I_k \sin \varphi_k$$

Реактивная мощность в цепи несинусоидального тока определяется суммой реактивных мощностей гармоник.

Постоянная составляющая реактивной мощности отсутствует так как для постоянного тока колебание мощности (энергии) немислимо.

Полная, или кажущаяся, мощность в цепях несинусоидального тока равна $S=UI$.

Угол сдвига фаз φ между эквивалентными синусоидами напряжения и тока выбирается таким, чтобы активная мощность эквивалентного синусоидального тока была равна активной мощности несинусоидального тока: $\cos \varphi_s = \frac{P_s}{U_s I_s}$

Вопросы к теме 12

1. Назвать причины возникновения несинусоидальных ЭДС, токов и напряжений в электрических цепях.
2. Написать аналитическое выражение несинусоидальных периодических величин в форме тригонометрического ряда.
3. Сформулировать понятия действующего значения несинусоидального периодического тока и напряжения, коэффициентах формы и амплитуды, искажения периодической кривой.
4. Рассказать о расчете мощности при несинусоидальном токе
5. Рассказать порядок расчета линейных электрических цепей при несинусоидальном периодическом напряжении на её входе.

ТЕМА 13 НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

13.1 Нелинейные элементы

Нелинейными электрическими цепями переменного тока называются цепи, в состав которых входят один или несколько нелинейных сопротивлений (нелинейных элементов) переменного тока.

Характерной чертой нелинейных элементов переменного тока являются нелинейная-амперная, кулон-вольтная, вебер-амперная и другие характеристики.

Переменному току оказывают сопротивление активные сопротивления, индуктивности и ёмкости. В соответствии с этим нелинейные сопротивления переменного тока могут быть разделены на три группы: 1) группа нелинейных активных сопротивлений; 2) группа нелинейных индуктивных сопротивлений; 3) группа нелинейных емкостных сопротивлений.

1. В качестве управляемых нелинейных активных сопротивлений широкое распространение получили электронные и полупроводниковые приборы, магнитные усилители и другие устройства. Неуправляемыми нелинейными активными сопротивлениями являются электрическая дуга, полупроводниковые выпрямители, лампы накаливания и др. Нелинейные элементы этой группы способствуют созданию несинусоидальных токов в электрических цепях.

2. Под нелинейными индуктивными сопротивлениями, или иначе нелинейными индуктивностями, понимают катушки с ферромагнитными сердечниками, для которых зависимость магнитного потока в сердечнике от тока в катушке нелинейна. Катушка с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока искажает форму кривой тока, т.е. является генератором несинусоидального тока.

3. Для нелинейных конденсаторов зависимости заряда Q на обкладках от напряжения, приложенного к конденсатору, нелинейна. Пространство между обкладками нелинейного конденсатора заполнено сегнетоэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого зависит от напряжённости электрического поля между обкладками конденсатора.

13.2 Выпрямители – источники несинусоидального тока

Выпрямителями называют аппараты, преобразующие переменный ток в постоянный.

Основным элементом любого выпрямителя является электрический вентиль. Электрический вентиль обладает малым сопротивлением в прямом направлении и большим в обратном направлении. Вентиль имеет нелинейную вольт-амперную характеристику (рис. 13.1), поскольку обладает практически односторонней проводимостью. Графическое изображение электрического вентиля в электрических схемах и положительное направление прямого напряжения и тока показано на рисунке 13.1 а.

Вентиль, сопротивление которого в прямом направлении равно нулю, а в обратном – бесконечно большое, считается идеальным вентиляем. Характеристика идеального вентиля дана на рисунке 13.1 б. Вентиль, сопротивлением которого в прямом направлении пренебречь нельзя, а обратным током можно пренебречь, имеет вольт-амперную характеристику, изображённую на рисунке 3.59в. Вольт-амперная

характеристика реального полупроводникового вентиля изображена на рисунке 13.1 г.

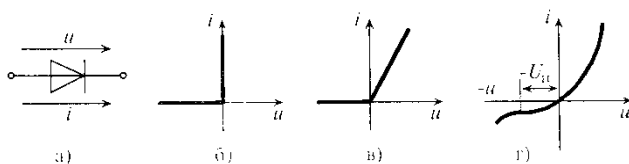


Рисунок 13.1 – Вентиль

В схеме однополупериодного выпрямителя вентиль включается последовательно с потребителем R , ток которого необходимо выпрямить (рис. 13.2 а).

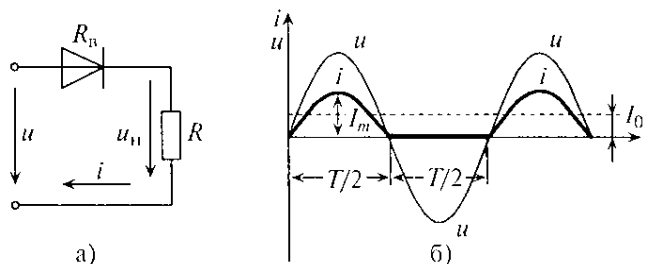


Рисунок 13.2 – Схема однополупериодного выпрямителя

Если к цепи, изображённой на рисунке 13.2 а, приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$ (и обратным током вентиля можно пренебречь), то ток в положительный полупериод изменится также по синусоидальному закону:

$$i = \frac{u}{R_{\text{вн}} + R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R_{\text{вн}} + R} = I_m \sin \omega t.$$

В течение же отрицательного полупериода напряжения ($u < 0$) тока в цепи нет, так как предполагается $R_{\text{обр}} = \infty$. Таким образом, в рассматриваемой цепи создаётся однополупериодное выпрямление синусоидального тока (рис. 13.2 б).

13.3 Катушка с ферромагнитным сердечником

Наиболее распространенным нелинейный элемент переменного тока в электрических машинах, трансформаторах и других аппаратах является катушка со стальным сердечником (рис. 13.3).

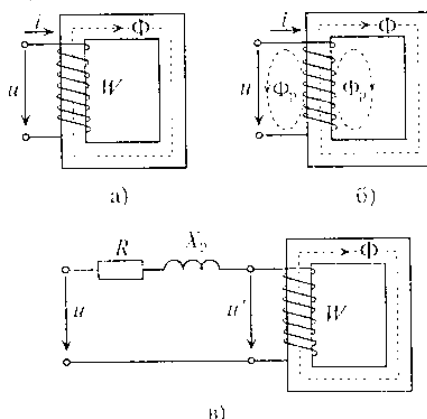


Рисунок 13.3 – Катушка со стальным сердечником

Если магнитный поток в сердечнике изменяется по синусоидальному закону $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, то при отсутствии рассеяния он индуцирует в катушке, расположенной на сердечнике, ЭДС самоиндукции

$$e_L = -W \frac{d\Phi}{dt} = -W \frac{d\Phi_m \sin \omega t}{dt} = -\omega W \Phi_m \cos \omega t = E_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Если пренебречь активным сопротивлением катушки, то напряжение, приложенное к ней, равно по величине и противоположно по знаку ЭДС самоиндукции:

$$u = -e_L = \omega W\Phi_m \cos \omega t = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

где $U_m = \omega W\Phi_m = 2\pi f W\Phi_m$, а действующее значение напряжения

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f W\Phi_m}{1,41}.$$

или

$$U = 4,44 f W\Phi_m.$$

Если к катушке со стальным сердечником приложено синусоидальное напряжение, то в сердечнике возникает синусоидальный магнитный поток. Ток в катушке при этом отстает от напряжения несинусоидальным. Это связано с нелинейной зависимостью между магнитным потоком и током $\Phi = f(i)$. На рисунке 13.4 а показана петля гистерезиса, изображающая эту зависимость.

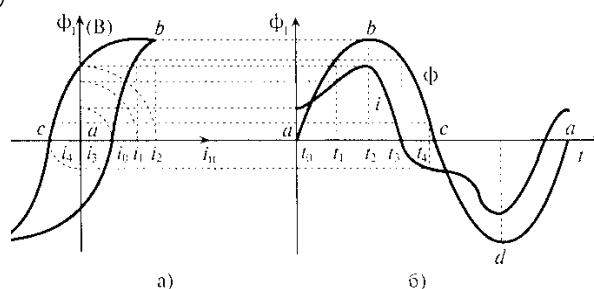


Рисунок 13.4 – Петля гистерезиса

Для каждого момента времени (t_0, t_1, t_2 и т.д.) по петле гистерезиса находят значение тока и откладывают его на ординате магнитного потока (смотри пунктированные линии на рисунке 13.4). При увеличении магнитного потока пользуются участком ab петли гистерезиса, при уменьшении – участка bc и т.д.

Как видно (рис. 13.4 б), кривая тока при синусоидальном магнитном потоке несинусоидальная.

13.4 Мощность потерь. Векторная диаграмма катушки со стальным сердечником

При расчете цепи катушки со стальными сердечниками несинусоидальный намагничивающий ток i часто заменяют эквивалентным синусоидальным, который имеет то же действующее значение, что и несинусоидальный. При этой замене пользуются поправочным коэффициентом ξ зависящим от формы кривой тока, которая в свою очередь зависит от максимального значения индукции в сердечнике B_m .

При синусоидальном токе векторная диаграмма для катушки (без активного сопротивления) со стальным сердечником (без рассеяния) может быть построена как для идеальной индуктивности, т. е. ток отстает от напряжения на угол 90° . Если учесть потери на циклическое перемагничивание в сердечнике $P_{цп}$ и на вихревые токи $P_{вт}$, т.е. потери в стали $P_{ст} = P_{цп} + P_{вт}$, то ток в катушке со стальным сердечником отстает от напряжения на угол $\varphi' < 90^\circ$ (рис. 13.5 а). При этом появляется активная составляющая тока

$$I_a = \frac{P_{ст}}{U} = I \cos \varphi' = I \sin \delta,$$

совпадающая по фазе с напряжением, и реактивная составляющая тока

$$I_p = I \sin \varphi' = I \cos \delta.$$

Реактивная составляющая тока, совпадающая по фазе с магнитным потоком и намагничивающая сердечник, называется намагничивающим током катушки.

Угол δ , на который ток I опережает по фазе магнитный поток Φ (рис. 13.5 а), называется углом потерь

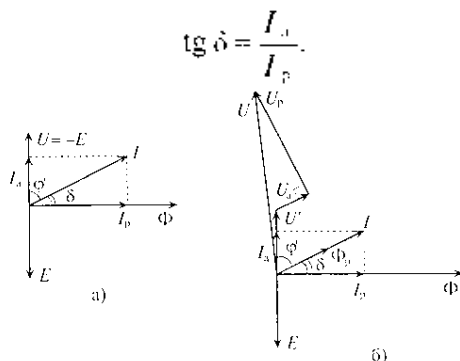


Рисунок 13.5 – Векторная диаграмма катушки со стальным сердечником
Потери в стали (магнитные потери) можно определить выражением

$$P_{ст} = P_{уд} G,$$

где G – масса ферромагнитного сердечника, кг; $P_{уд}$ – удельная мощность потерь в стали, Вт/кг.

Удельную мощность потерь вычисляют по формуле

$$P_{уд} = P_{1,0/50} B_m,$$

где $P_{1,0/50}$ – потери в стали при индукции $B_m=1$ Тл и частоте $f=50$ Гц; B_m – максимальное значение индукции.

Если не пренебрегать активным сопротивлением катушки R , то падение напряжения на этом сопротивлении $U_a=IR$ совпадает по фазе с током I . На активном сопротивлении возникают потери мощности, которые являются электрическими потерями и называются потерями в меди $P_M=I^2R$. Эти потери складываются с магнитными и создают суммарные потери в катушке со стальным сердечником $P= P_{ст}+P_M$. Суммарные потери P влияют на угол потерь δ и на активную составляющую тока катушки $I_a=I \cos \varphi$, так как $\cos \varphi = \frac{P}{UI}$.

Большая часть магнитного потока, т. е. основной поток Φ , замыкается в сердечнике, а незначительная часть потока Φ , рассеивается. Поток рассеяния Φ_p индуктирует в катушке ЭДС рассеяния. На преодоление ЭДС рассеяния в напряжении, приложенном к катушке, появляется составляющая, которая опережает ток на угол 90° . Поток рассеяния Φ_p совпадает по фазе с током.

Следовательно, напряжение на зажимах катушки со стальным сердечником складывается из напряжения U' , U_a , U_p . Это используется при построении векторной диаграммы катушки со стальным сердечником (рис. 3.63б).

13.5 Схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником

При решении практических задач для идеализированной катушки можно составить схему замещения с постоянными (при данном напряжении на катушке) величинами сопротивлений: активного R_M и индуктивного X_M , соединенными последовательно (рис. 13.6 а).

При этом потери в ферромагнитном сердечнике P_M заменяют равными электрическими потерями в активном сопротивлении:

$$R_M = \frac{P_M}{I^2} = \frac{U'}{I} \cos \varphi,$$

а X_M определяют из уравнения

$$X_M = \frac{U'}{I} \sin \varphi.$$

Вместо последовательного соединения R_M , X_M можно включить параллельно две ветви (рис. 13.6 б).

В первой ветви, содержащей активную проводимость G_M , ток равен активной составляющей тока катушки I_a :

$$G_M = P_M / (U')^2 = I_a / U' = R_M / (R_M^2 + X_M^2)$$

Вторая ветвь содержит реактивную проводимость B_M и намагничивающий ток I_M :

$$B_M = I_M / U' = X_M / (R_M^2 + X_M^2).$$

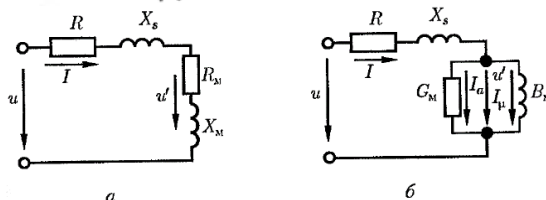


Рисунок 13.6 – Схема замещения с постоянными сопротивлениями активного R_M и индуктивного X_M , соединенными последовательно

13.6 Феррорезонанс

В цепи с линейными элементами при постоянной частоте источника питания резонанс достигается непосредственным изменением индуктивности или емкости.

Если индуктивность или емкость нелинейны, то резонанс может наступать при изменении тока в цепи или приложенного напряжения без какой-либо регулировки катушки и конденсатора.

Индуктивность или емкость такой нелинейной цепи изменяется в связи с изменением тока или напряжения, что ведет к изменению её собственной частоты, которая может принять величину, равную частоте вынужденных колебаний источника.

В цепях, содержащих катушку со стальным сердечником и конденсатор, резонансные явления, связанные с нелинейным характером индуктивности, называют феррорезонансом.

Вопросы к теме 13

1. Сформулировать понятие нелинейных электрических цепей, нелинейного элемента.
2. Назвать отличия нелинейных элементов от линейных
3. Сформулировать классификацию нелинейных элементов переменного тока. Привести примеры.
4. Дать определение выпрямителю электрического тока.
5. Рассказать о принципе действия вентиля.
6. Рассказать об особенностях катушки со стальным сердечником.
7. Дать определение феррорезонансу.

ТЕМА 14 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

14.1 Основные понятия

Переходный процесс в электрической цепи – это электромагнитный процесс, возникающий в электрической цепи при переходе от одного установившегося (принужденного) режима к другому. Установившимся (принужденным) называется режим работы электрической цепи, при котором напряжение и токи цепи в течение длительного времени остаются неизменными.

Такой режим в электрической цепи устанавливается при длительном действии источников постоянной или переменной ЭДС при неизменных параметрах этой цепи R , L и C .

Переходный процесс вызывается коммутацией в цепи. Коммутацией называется процесс замыкания или размыкания рубильников или выключателей. Переходный процесс может быть вызван изменением параметров электрической цепи R , L или C .

Переходный процесс базируется на двух законах коммутации:

- 1) ток в индуктивности не может изменяться скачком;
- 2) напряжение на емкости не может изменяться скачком.

Переходный процесс является быстропротекающим процессом, длительность которого обычно составляет десятые, сотые и даже миллионные доли секунды и сравнительно редко — секунды и даже десятки секунд.

Переходный процесс в линейных цепях можно рассматривать как результат наложения двух процессов:

- 1) нового установившегося режима, который наступает после коммутации;
- 2) свободного процесса, обеспечивающего переход цепи от прежнего установившегося режима к новому установившемуся режиму.

Таким образом, ток i цепи в течение переходного процесса можно представить суммой двух токов: нового установившегося i_y и свободного $i_{св}$, возникающего после коммутации:

$$i = i_y + i_{св}.$$

Аналогично напряжение в течение переходного процесса равно

$$u = u_y + u_{св}.$$

В результате переходного процесса происходят изменения тока, напряжения, фазы, частоты и т.д.

14.2 Подключение катушки индуктивности к источнику с постоянным напряжением

Если катушку индуктивности (RL) подключить к источнику с постоянным напряжением U (замыкание ключа K), то ток i в неразветвленной цепи (рис. 14.1 а) будет увеличиваться от нуля (в начале переходного процесса) до установившегося значения

$$i_y = I = \frac{U}{R}.$$

Установившийся, т. е. постоянный, ток i не индуцирует в катушке ЭДС самоиндукции, поэтому индуктивное сопротивление в установившемся режиме отсутствует.

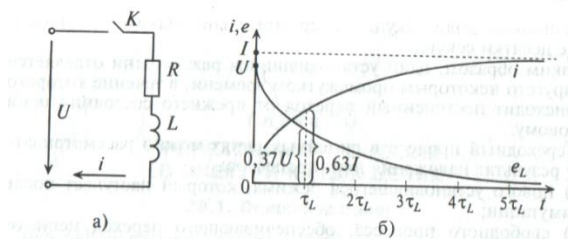


Рисунок 14.1 – Подключение катушки индуктивности к источнику с постоянным напряжением

Этот увеличивающийся ток i индуцирует в индуктивности L катушки ЭДС самоиндукции

$$e_L = -L \frac{di}{dt}.$$

Закон изменения тока

$$i = I - Ie^{-t/\tau_L} = I + (-Ie^{-t/\tau_L}),$$

$$\tau_L = \frac{L}{R},$$

где e – основание натурального логарифма ($e = 2,71$); I – установившийся ток (i_y); $(-Ie^{-t/\tau_L})$ – свободный ток ($i_{св}$), так как $i = i_y + i_{св}$, т.е. $i_{св} = -Ie^{-t/\tau_L}$.

Уравнение, которое позволяет определить величину тока в цепи с индуктивностью, в любой момент переходного процесса RL -цепи при подключении реальной катушки индуктивности к источнику с постоянным напряжением U , записывается в виде

$$i = I(1 - e^{-t/\tau_L}).$$

Теоретически переходный процесс происходит бесконечно долго. Практически переходный процесс в рассматриваемой цепи считается законченным, когда ток I увеличивается до 99 % установившегося тока I .

ЭДС самоиндукции в рассматриваемой, цепи, вызванная свободным током $i_{св}$, определяется выражением

$$e_L = Ue^{-t/\tau_L}.$$

Таким образом, ЭДС самоиндукции в RL -цепи, подключенной к источнику с постоянным напряжением U , будет уменьшаться. Так, за время $t = \tau_L$, ЭДС самоиндукции уменьшится до $0,37U$, а за время $t = 4,6\tau_L$ — до $0,01 U$, т. е. до 1 % постоянного напряжения U .

Увеличение тока и уменьшение ЭДС самоиндукции катушки при подключении катушки к источнику с постоянным напряжением U показаны на графике (рис. 14.1 б).

14.3 Отключение и замыкание RL -цепи

Если цепь с катушкой, в которой проходит установившийся ток I (рис. 14.2 а), разомкнуть, то ток i в такой цепи с большой скоростью уменьшается до нуля и в катушке индуцируется большая ЭДС самоиндукции e_L

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

Эта ЭДС полностью приложена к клеммам ключа, так как при размыкании сопротивление ключа становится бесконечно большим. Эта ЭДС вызывает значительное увеличение электрического поля между контактами ключа, а, следовательно, и напряженности поля. Большая напряженность электрического поля может вызвать искровой и даже дуговой разряд между размыкающимися контактами ключа, в результате чего обгорают контакты ключа. Поэтому рубильники в RL -цепях шунтируются специальными устройствами, которые обеспечивают гашение дугового разряда. Для гашения дугового разряда необходимо одновременно с отключением катушки индуктивности от источника замкнуть ее на разрядное сопротивление R_0 (рис. 14.2 а).

Уменьшение тока i_{CB} при отключении катушки от источника происходит по закону

$$i_{CB} = I e^{-t/\tau_L} .$$

Наглядно это уменьшение можно наблюдать на рис. 14.2 б, если кривую изменения e_L считать кривой уменьшения тока i_{CB} в соответствующем масштабе.

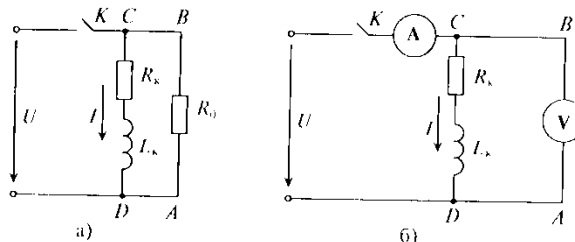


Рисунок 14.2 – Отключение и замыкание RL -цепи

Постоянная времени при отключении катушки от источника с постоянным напряжением U определяется как и при включении катушки на это напряжение, т. е. $\tau_L = L/R$.

Если катушку с установившимся током I , шунтированную сопротивлением R_0 (рис. 14.2 а), отключить от источника (разомкнуть ключ K), то в замкнутом контуре $ABCD$ в начальный момент коммутации ($t_0 = 0$) пройдет ток $i_{CB} = Ie^{-0} = I$, т. е. установившийся ток. Этот ток I может оказаться недопустимо большим для резистора с сопротивлением R_0 .

Для определения активного сопротивления катушки R_k и полного ее сопротивления Z_k включают амперметр A и вольтметр V (рис. 14.2 б), т. е. вместо резистора с сопротивлением R_0 в контур $ABCD$ (рис. 14.2 б) включен вольтметр V . Этот вольтметр может не быть рассчитан на установившийся ток I , проходящий через него при размыкании ключа, в результате чего может сгореть. Чтобы не «сжечь» вольтметр (рис. 14.2 б), сначала необходимо отключить вольтметр, а затем разомкнуть ключ K .

Как видно, за счет переходных процессов в цепях с индуктивностью возникают большие токи и напряжения. С этим необходимо считаться и учитывать при проектировании и эксплуатации цепей с индуктивностью.

14.4 Зарядка, разрядка и саморазрядка конденсатора

Если конденсатор с сопротивлением (утечки) R и емкостью C подключить к источнику с постоянным напряжением U (замыканием ключа А), то в цепи (рис. 14.3 а) появится ток зарядки конденсатора:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt},$$

где u_c — напряжение на конденсаторе в любой момент времени переходного процесса.

По второму закону Кирхгофа для цепи зарядки конденсатора (рис. 14.3 а) можно записать уравнение

$$U = iR + u_c \quad \text{или} \quad U - u_c = iR = RC \frac{du_c}{dt},$$

где произведение RC имеет размерность времени, обозначается буквой τ и называется постоянной времени переходного процесса в RC -цепи, т. е.

$$\tau_c = RC.$$

$$U - u_c = \tau_c \frac{du_c}{dt}.$$

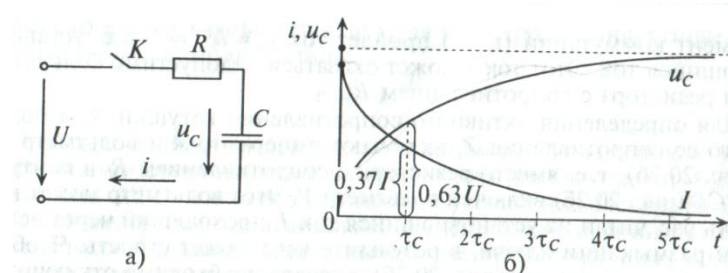


Рисунок 14.3 - Зарядка, разрядка конденсатора

$$u_c = U - Ue^{-t/\tau_c} = U + (-Ue^{-t/\tau_c}),$$

где U — установившееся напряжение u_c RC -цепи; $(-Ue^{-t/\tau_c})$ — свободная составляющая напряжения $u_{св}$ на конденсаторе; т.е. $U_c = U_y + U_{св}$.

Следовательно, напряжение на заряжающемся конденсаторе в любой момент времени t переходного процесса определяется выражением

$$u_c = U(1 - e^{-t/\tau_c}).$$

Теоретически зарядка конденсатора длится бесконечно долго, а практически конденсатор считается заряженным, когда напряжение на нем достигает 99 % напряжения источника U .

Ток i при зарядке конденсатора уменьшается по закону

$$i = Ie^{-t/\tau_c},$$

где $I = U/R$ максимальный ток, который имеет место в начальный момент $t=0$ зарядки конденсатора (момент коммутации).

За время $t=\tau_c$ ток в цепи заряжающегося конденсатора уменьшится до $0,37I$, а за время $t=4,6\tau_c$ - до $0,01I$, при котором переходный процесс можно считать законченным.

Графики изменения напряжения на конденсаторе и тока в цепи зарядки конденсатора изображены на рис. 14.4.

Если конденсатор емкостью C , заряженный предварительно до напряжения U , разряжать через резистор с сопротивлением R (рис. 14.4 а), то напряжение u_c на конденсаторе и ток в цепи разрядки будут уменьшаться по закону

$$u_c = Ue^{-t/\tau_c},$$

$$i = Ie^{-t/\tau_c},$$

где U — напряжение на конденсаторе до начала разрядки (при $t=0$), а $I=U/R$ максимальный ток в начальный момент разрядки (при $t=0$), $\tau_c = RC$ — постоянная времени в цепи разрядки конденсатора.

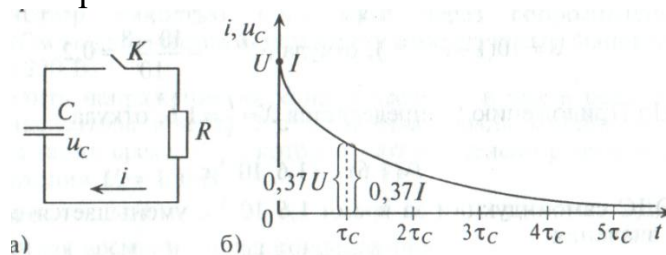


Рисунок 14.4 - Графики изменения напряжения на конденсаторе и тока в цепи зарядки конденсатора

За время $t=\tau_c$ напряжение и ток уменьшатся до 37 % своих максимальных значений. Изменение напряжения и тока на разряжающемся конденсаторе показаны на рис. 14.4 б (в разных масштабах).

Если конденсатор емкостью C , заряженный до напряжения U , отсоединить от источника, то он будет разряжаться через свой диэлектрик. Напряжение на нем будет уменьшаться по закону $u_c = Ue^{-t/\tau_c}$. Процесс разрядки конденсатора через свой диэлектрик называется саморазрядом.

Постоянная времени саморазряда зависит от физических свойств диэлектрика

$$\tau_c = \rho \epsilon_0 \epsilon_r,$$

где ρ — удельное сопротивление диэлектрика; ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ_r — диэлектрическая проницаемость диэлектрика (относительная). Для определения напряжения, тока, ЭДС в любой момент переходного процесса RL -цепи и RC -цепи можно воспользоваться таблицей показательных функций.

Вопросы по теме 14

1. Сформулировать понятие переходного процесса электрической цепи.
2. Объяснить суть процесса коммутации.
3. Назвать на каких законах коммутации базируется процесс коммутации.
4. Назвать длительность переходного процесса.
5. Записать выражение для вычисления тока и напряжения переходного процесса.
6. Назвать цель изучения переходных процессов.
7. Описать процесс зарядки, разрядки и саморазрядки конденсатора. Написать основные выражения законов изменения тока и напряжения.

РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ТЕМАТИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ №1

1. Назвать режимы работы электрической цепи, охарактеризовать каждый из них.
2. Дать определение ветви электрической цепи.
3. Сформулировать первый и второй законы Кирхгофа.
4. Рассказать особенности последовательного и параллельного соединения резисторов в электрической цепи.
5. Рассказать алгоритм расчета электрической цепи методом узловых и контурных уравнений
6. Рассказать алгоритм расчета электрической цепи методом контурных токов
7. Записать формулу для расчета мощности источника.
8. Записать формулу для расчета удельного сопротивления материала. От каких параметров оно зависит?
9. Сформулировать закон Ома для участка электрической цепи.

ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ТЕМАТИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ №2

1. Сформулировать правило левой руки для определения направления вектора ЭДС индукции.
2. Записать формулу для расчета ЭДС провода, перемещающемся в однородном магнитном поле.
3. Записать формулу для расчета ЭДС самоиндукции.
4. Записать формулу для расчета ЭДС взаимной индукции.
5. Дать определение коэффициенту взаимной индукции.

ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ТЕМАТИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ №3

1. Дать определение магнитной индукции. Записать выражение для определения элементарной магнитной индукции.
2. Дать определение однородному магнитному полю
3. Назвать, в каких единицах выражается магнитная индукция.
4. Дать определение абсолютной магнитной проницаемости. Назвать единицу измерения.
5. Сформулировать классификацию веществ в зависимости от магнитной проницаемости. Привести примеры.
6. Дать определение магнитному потоку. Назвать единицу измерения.
7. Рассказать, как определить элементарный магнитный поток через элементарную площадку и через всю поверхность площадью S . Назвать, чему равен магнитный поток сквозь замкнутую поверхность.
8. Дать определение напряженности магнитного поля.
9. Назвать, от чего зависит магнитная индукция B в магнитопроводе катушки.
10. Записать формулы для вычисления магнитного сопротивления и магнитного потока магнитной цепи.
11. Записать формулу для вычисления магнитного напряжения поля по замкнутому контуру.
12. Рассказать алгоритм расчета прямой и обратной задачи неразветвленной однородной магнитной цепи.
13. Сформулировать закон Ома для магнитной цепи.
14. Сформулировать законы Кирхгофа для магнитной цепи.

ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ТЕМАТИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ №4

1. Дать определение трехфазной системе ЭДС
2. Рассказать про соединение нагрузки «треугольником» и «звездой». Записать чему равно соотношение между линейным и фазным током и напряжением в каждом из соединений.
3. Записать выражение для расчёта коэффициента мощности.
4. Записать выражения для расчёта активной, реактивной и полной мощностей при симметричной и несимметричной нагрузках.
5. Рассказать о назначении нулевого провода.
6. Записать формулу для расчета полного сопротивления обмотки трёхфазной цепи.

ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ТЕМАТИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ №5

1. Написать аналитическое выражение несинусоидальных периодических величин в форме тригонометрического ряда.
2. Сформулировать понятия действующего значения несинусоидального периодического тока и напряжения
3. Рассказать о расчете мощности при несинусоидальном токе. Записать формулы для расчета мощности
4. Рассказать порядок расчета линейных электрических цепей при несинусоидальном периодическом напряжении на её входе.

ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ОБЯЗАТЕЛЬНОЙ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ №1

1. Рассказать про особенности последовательного и параллельного соединения резисторов в электрической цепи.
2. Дать определение сопротивления. Записать формулу для вычисления силы тока и записать единицу измерения.
3. Дать определение удельному электрическому сопротивлению. Записать формулу для расчёта удельного электрического сопротивления, единицу измерения.
4. Дать определение проводимости проводника. Записать формулу для расчёта проводимости и единицу измерения.
5. Сформулировать закон Ома для участка и полной цепи.
6. Рассказать алгоритм расчета электрической цепи методом узловых и контурных уравнений.
7. Рассказать алгоритм расчета электрической цепи методом контурных токов.
8. Рассказать алгоритм расчета электрической цепи методом свёртывания цепи.
9. Рассказать алгоритм расчета электрической цепи методом узлового напряжения.
10. Рассказать алгоритм расчета электрической цепи методом эквивалентного генератора.
11. Рассказать алгоритм расчета электрической цепи методом наложения токов.
12. Дать определение потенциала. Записать формулу для вычисления силы тока и записать единицу измерения.
13. Дать определение потенциальной диаграмме. Рассказать последовательность её построения.
14. Дать понятие ЭДС, мощность источника и приёмника электрической энергии.
15. Записать уравнение баланса мощностей.

ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ОБЯЗАТЕЛЬНОЙ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ №2

1. Записать угол сдвига фаз между током и напряжением для катушки индуктивности, конденсатора и активного сопротивления. Изобразить векторные диаграммы этих элементов.
2. Назвать условие возникновения резонанса напряжений. Изобразить схему цепи, в которой может возникнуть резонанс напряжений, векторную диаграмму при резонансе.
3. Назвать условие возникновения резонанса токов. Изобразить схему цепи, в которой может возникнуть резонанс токов, векторную диаграмму при резонансе.
4. Записать выражение для вычисления полного сопротивления цепи.
5. Записать выражение мгновенного значения тока, напряжения, ЭДС.
6. Записать выражения для вычисления активной, реактивной и полной мощностей. Назвать единицы их измерения.
7. Перечислить основные характеристики переменного тока.
8. Записать выражение для вычисления полного сопротивления цепи в комплексной форме.
9. Записать выражения для вычисления полной мощности в комплексной форме.
10. Сформулировать законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме, записать их математические выражения.
11. Записать уравнение баланса мощностей в комплексной форме.
12. Записать выражение мгновенного значения тока и напряжения.
13. Рассказать алгоритм расчёта цепи переменного тока символическим методом.
14. Сформулировать понятие векторной диаграммы.
15. Рассказать принцип построения векторной диаграммы в комплексной системе координат.

ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ЭКЗАМЕНУ

1 Уровень

1. Как изменится сила взаимодействия и напряженность поля двух точечных зарядов, если их удалять друг от друга? Подтвердить формулой.

Ответ:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

2. Как изменится емкость конденсатора, если увеличить расстояние между пластинками конденсатора. Подтвердить формулой.

Ответ:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

3. Как изменится сопротивление металлического проводника, если увеличить его сечение? Подтвердить формулой.

Ответ:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

4. Как изменится сопротивление металлического проводника, если температура окружающей среды повысится? Подтвердить формулой.

Ответ:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

5. Как изменится ток в электрической цепи, если сопротивление цепи увеличить? Подтвердить формулой.

Ответ:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

6. Как изменится эквивалентная емкость цепи, если конденсаторы соединить параллельно? Подтвердить формулой.

Ответ:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.



7. Как изменится энергия электростатической цепи, если конденсаторы соединить параллельно? Подтвердить формулой.

Ответ:

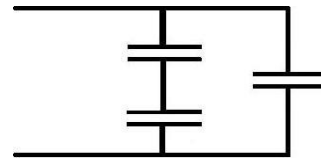
- 1) увеличивается;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.



8. Как соединены конденсаторы?

Ответ:

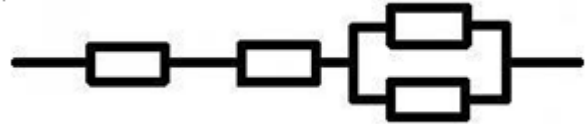
- 1) последовательно;
- 2) параллельно;
- 3) смешанно.



9. Как изменится ток в цепи, если резистор R_1 закоротить? Подтвердить формулой.

Ответ:

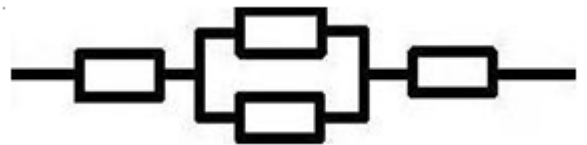
- 1) увеличивается;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.



10. Как изменится мощность в электрической цепи, если резистор R_1 закоротить? Подтвердить формулой.

Ответ:

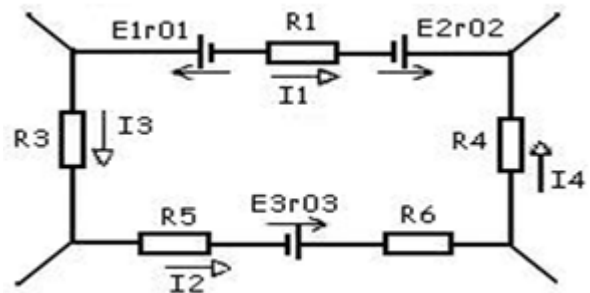
- 1) увеличивается;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.



11. Какое уравнение, составленное по второму правилу Кирхгофа для замкнутого контура, правильное?

Ответ:

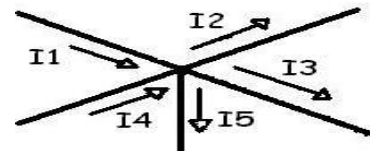
- 1) $E_1 + E_3 - E_2 = I_1(r_{01} + R_1 + r_{02}) + I_3R_3 - I_4R_4 + I_2(R_5 + r_{03} + R_6)$;
- 2) $-E_1 + E_2 - E_3 = I_1(r_{01} + R_1 + r_{02}) - I_4R_4 - I_3R_3 - I_2(R_5 + R_6 + r_{03})$;
- 3) $-E_1 + E_3 - E_2 = -I_1(r_{01} + R_1 + r_{02}) - I_4R_4 - I_3R_3 + I_2(R_5 + r_{03} + R_6)$.



12. Какое уравнение, составленное для узла электрической цепи правильное?

Ответ:

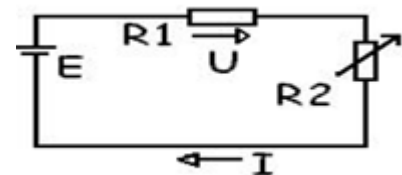
- 1) $I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5$;
- 2) $I_1 + I_3 = I_2 + I_4 + I_5$;
- 3) $I_1 + I_4 = I_2 + I_3 + I_5$.



13. В режиме холостого хода чему равно напряжение на зажимах постоянного сопротивления R_1 и ток в цепи.

Ответ:

- 1) $U_1 = 0, I = I_{\max}$;
- 2) $U_1 = 0, I = 0$;
- 3) $U_1 = E, I = I_{\max}$.



14. Сколько уравнений по правилам Кирхгофа необходимо составить для расчёта сложной цепи?

Ответ:

- 1) столько, сколько узлов;
- 2) столько, сколько ветвей;
- 3) столько, сколько контуров.

15. Какой физической величиной характеризуется каждая точка магнитного поля?

Ответ:

- 1) магнитной индукцией и эл. магнитной силой;
- 2) магнитной индукцией и напряженностью;
- 3) напряженностью и эл. магнитной силой.

16. Что является целью расчёта магнитной цепи при решении прямой и обратной задачи?

Ответ:

- 1) прямая задача $\Phi = f(F)$, обратная задача $F = f(\Phi)$;
- 2) прямая задача $F = f(\Phi)$, обратная задача $\Phi = f(F)$;
- 3) прямая задача $\Phi = (F)$, обратная задача $F = (\Phi)$.

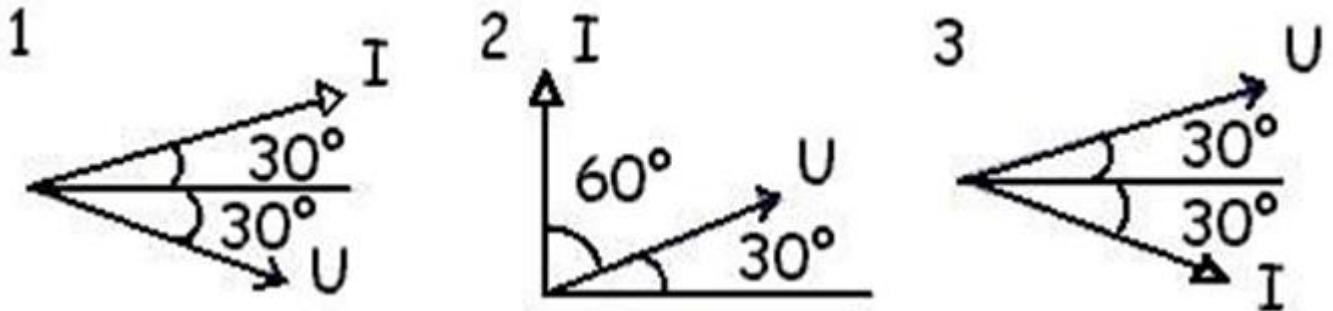
17. От чего зависит индуктивность катушки?

Ответ:

- 1) от параметров катушки;
- 2) от тока;
- 3) от напряжения.

18. Какая векторная диаграмма справедлива для мгновенных значений тока и напряжения: $i = I_m \sin(\omega t + 30^\circ)$, $u = U_m \sin(\omega t - 30^\circ)$?

Ответ:



19. Заданы уравнения двух токов: $i_1 = 10 \sin(\omega t + 45^\circ)$ и $i_2 = 10 \sin(\omega t - 45^\circ)$, чему равен суммарный ток?

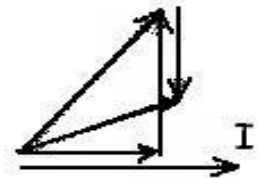
Ответ:

- 1) $i = 20 \sin \omega t$;
- 2) $i = \sqrt{2} 10 \sin \omega t$;
- 3) $i = 0,707 \sin \omega t$.

20. Для какого соотношения реактивных сопротивлений в неразветвленной цепи переменного тока справедлива векторная диаграмма напряжений?

Ответ:

- 1) $X_L > X_C$;
- 2) $X_L < X_C$;
- 3) $X_L = X_C$.



21. Изменением каких величин в эл. цепях можно добиться резонанса?

Ответ:

- 1) изменением тока;
- 2) изменением частоты;
- 3) изменением напряжения.

22. Как изменяется ток в цепи при резонансе напряжений и резонансе токов?

Ответ:

- 1) при резонансе напряжений ток растёт, при резонансе токов - ток уменьшается;
- 2) при резонансе напряжений ток уменьшается, при резонансе токов ток растёт;
- 3) при резонансе напряжений и резонансе токов - ток в цепи одинаков.

23. Для увеличения $\cos\omega$ к двигателю необходимо параллельно подсоединить:

Ответ:

- 1) катушку индуктивности;
- 2) конденсатор;
- 3) активное сопротивление.

24. Как изменится ток в реальной катушке индуктивности, если в неё ввести железный сердечник?

Ответ:

- 1) увеличится, т.к. X_L - увеличится;
- 2) уменьшится, т.к. X_L - уменьшится;
- 3) уменьшится, т.к. X_L - увеличится.

25. Какое соотношение между фазными и линейными напряжениями и токами справедливо при соединении трехфазного приемника с симметричной нагрузкой звездой и треугольником?

Ответ:

- | | | |
|-------------|------------------------|--------------------------|
| 1) ЗВЕЗДА | $U_L = U_\phi$ | $I_L = I_\phi$; |
| ТРЕУГОЛЬНИК | $U_L = U_\phi$ | $I_L = \sqrt{3}I_\phi$; |
| 2) ЗВЕЗДА | $U_L = \sqrt{3}U_\phi$ | $I_L = I_\phi$; |
| ТРЕУГОЛЬНИК | $U_L = U_\phi$ | $I_L = \sqrt{3}I_\phi$; |
| 3) ЗВЕЗДА | $U_L = 3U_\phi$ | $I_L = I_\phi$; |
| ТРЕУГОЛЬНИК | $U_L = U_\phi$ | $I_L = \sqrt{3}I_\phi$. |

26. Как определяется ток в нулевом проводе четырех проводной трехфазной цепи при неравномерной нагрузке фаз?

Ответ:

- 1) арифметической суммой фазных токов;
- 2) алгебраической суммой фазных токов;
- 3) геометрической суммой фазных токов.

27. Для какой цели применяется нулевой провод?

Ответ:

- 1) для выравнивания токов;
- 2) для выравнивания напряжений;
- 3) для выравнивания сопротивлений.

28. Как определяются линейные токи в проводах при соединении несимметричного трехфазного приемника треугольником?

Ответ:

- 1) $I_L = \sqrt{3}I_\phi$;
- 2) как алгебраическая сумма фазных токов;
- 3) как геометрическая сумма фазных токов.

29. Как можно добиться ферро резонанса напряжений, в отличие от резонанса напряжений?

Ответ:

- 1) изменением частоты;
- 2) изменением входного напряжения;
- 3) изменением индуктивности катушки и емкости конденсатора.

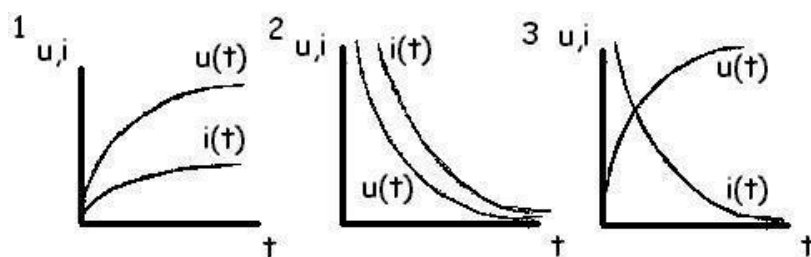
30. От чего зависят потери в стали и потери в меди в катушке с ферромагнитным сердечником?

Ответ:

- 1) потери в стали от веса сердечника, потери в меди от веса меди;
- 2) потери в стали от магнитной индукции, потери в меди от тока;
- 3) потери в стали и меди от частоты переменного тока.

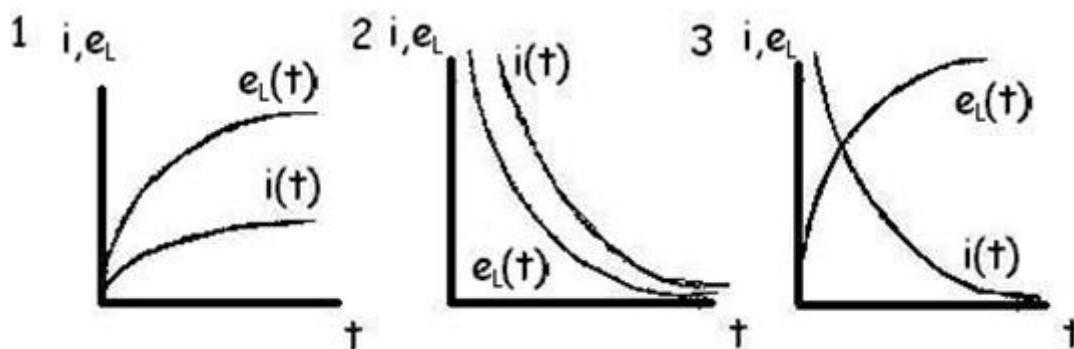
31. Какие кривые тока и напряжения характеризуют процесс зарядки конденсатора?

Ответ:



32. Какие кривые тока и ЭДС самоиндукции характеризуют переходной процесс при включении катушки индуктивности к источнику постоянного напряжения?

Ответ:



2 уровень

1. Рассказать о способах получения электрической энергии, её свойствах и применении.

2. Дать определение понятию электрическое поле и его основным характеристикам: заряд, напряжённость, потенциал, напряжение.

3. Рассказать о проводниках и полупроводниках и их поведении в электрическом поле.

4. Раскрыть понятия: электрическое сопротивление, удельная электрическая проводимость. Сформулировать закон Ома.

5. Рассказать о диэлектриках и их поведении в электрическом поле.

6. Рассказать об устройстве конденсаторов и их способах соединения.

7. Раскрыть понятия электрическая цепь и её элементы.

8. Схемы электрических цепей (принципиальная, монтажная, замещения).
9. Дать понятие ЭДС, мощность источника и приёмника электрической энергии. Сформулировать баланс мощностей.
10. Описать режимы работы электрических цепей.
11. Описать режим работы источника напряжения. Объяснить принцип построения потенциальной диаграммы электрической цепи.
12. Рассказать об особенностях последовательного и параллельного соединения элементов.
13. Рассказать алгоритм расчёта электрических цепей методом свёртывания. Привести пример в общем виде.
14. Дать определение понятию трёх лучевая звезда сопротивлений. Записать формулы для преобразования трёх лучевой звезды сопротивлений в треугольник сопротивлений.
15. Дать определение понятию треугольник сопротивлений. Записать формулы для преобразования треугольника сопротивлений в трёх лучевую звезду сопротивлений.
16. Рассказать алгоритм расчёта электрических цепей постоянного тока методом узлового напряжения. Привести пример в общем виде.
17. Рассказать алгоритм расчёта методом наложения токов. Привести пример в общем виде.
18. Сформулировать законы Кирхгофа. Рассказать алгоритм расчёта электрических цепей постоянного тока методом узловых и контурных уравнений. Привести пример в общем виде.
19. Рассказать алгоритм расчёта электрических цепей постоянного тока методом контурных токов. Привести пример в общем виде.
20. Рассказать алгоритм расчёта электрических цепей постоянного тока методом эквивалентного генератора. Привести пример в общем виде.
21. Дать определение нелинейные элементы электрической цепи. Объяснить графический метод расчета нелинейной цепи при последовательном и параллельном соединении нелинейных элементов.
22. Дать определение магнитная цепь. Провести аналогию между магнитной и электрической цепью. Рассказать о классификации магнитных цепей.
23. Охарактеризовать основные физические величины, используемые в теории магнитных цепей.
24. Охарактеризовать магнитные свойства вещества. Объяснить суть намагничивания ферромагнитных материалов, магнитный гистерезис.
25. Сформулировать законы магнитных цепей: законы Ома, законы Кирхгофа, закон Ампера, закон полного тока.
26. Рассказать алгоритм расчёта неразветвлённой однородной магнитной цепи.
27. Рассказать алгоритм расчёта неразветвлённой неоднородной магнитной цепи.
28. Изложить вывод формулы для расчета работы при перемещении проводника с током в магнитном поле. Дать определение потокосцепление, индуктивность и взаимная индуктивность.

29. Объяснить явление электромагнитной индукции. Сформулировать закон электромагнитной индукции. Рассказать правило Ленца.
30. Объяснить явление ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции.
31. Объяснить принцип действия трансформатора.
32. Дать понятие о переменном токе. Объяснить процесс получения синусоидальной ЭДС. Охарактеризовать параметры электрической цепи переменного тока.
33. Объяснить физические процессы в цепи переменного тока с активным сопротивлением. Активная мощность.
34. Объяснить физические процессы в цепи переменного тока с индуктивностью.
35. Объяснить физические процессы в цепи переменного тока с емкостью.
36. Охарактеризовать схему замещения катушки с потерями. Построить векторные диаграммы, треугольники напряжений, сопротивлений, мощностей.
37. Охарактеризовать схему замещения конденсатора с потерями. Построить векторные диаграммы, треугольники напряжений, сопротивлений, мощностей.
38. Объяснить физические процессы в цепи с последовательным соединением активных и реактивных элементов. Построить векторные диаграммы.
39. Объяснить физические процессы в цепи с параллельным соединением активных и реактивных элементов. Построить векторные диаграммы.
40. Объяснить резонанс токов и резонанс напряжений в электрической цепи.
41. Рассказать алгоритм расчёта с помощью векторных диаграмм неразветвленных цепей переменного тока. Привести пример в общем виде.
42. Рассказать алгоритм расчёта разветвленных цепей переменного тока методом активных и реактивных составляющих токов. Привести пример в общем виде.
43. Рассказать алгоритм расчёта разветвленных цепей переменного тока методом проводимостей. Привести пример в общем виде.
44. Объяснить суть символического метода расчета. Выразить синусоидальные величины: напряжение, ток, сопротивление, мощность комплексными числами.
45. Рассказать о согласном и встречном включении элементов с взаимоиндуктивностью.
46. Охарактеризовать трехфазные системы: ЭДС, токов, электрических цепей. Дать понятие: соединение обмоток генератора звездой и треугольником.
47. Дать определение понятию симметричная нагрузка в трехфазной цепи. Рассказать алгоритм расчёта симметричной трехфазной цепи, при соединении приемника звездой и треугольником.
48. Охарактеризовать трехфазные несимметричные цепи. Объяснить роль нейтрального провода.
49. Рассказать алгоритм расчёта несимметричной трехфазной цепи при соединении фаз приемника звездой символическим методом. Привести пример в общем виде.
50. Рассказать алгоритм расчёта несимметричной трехфазной цепи при соединении фаз приемника звездой графоаналитическим методом. Привести пример в общем виде.

51. Рассказать алгоритм расчёта несимметричных трехфазных цепей при соединении фаз приемника треугольником символическим методом. Привести пример в общем виде.

52. Рассказать алгоритм расчёта несимметричных трехфазных цепей при соединении фаз приемника треугольником графоаналитическим методом. Привести пример в общем виде.

53. Назвать причины возникновения несинусоидальной ЭДС, напряжения, тока. Записать аналитическое выражение в форме тригонометрического ряда.

54. Рассказать о симметричных несинусоидальных функциях.

55. Дать определение понятию действующая величина несинусоидального тока и мощности в цепи. Рассказать алгоритм расчёта электрической цепи с несинусоидальными ЭДС и токами.

56. Дать общую характеристику нелинейным цепям переменного тока. Рассказать о цепях с нелинейными активными сопротивлениями.

57. Объяснить принцип построения полной векторной диаграммы и схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником.

58. Назвать причины возникновения переходных процессов. Сформулировать законы коммутации.

59. Дать объяснение процессам при включении катушки индуктивности на постоянное напряжение.

60. Дать объяснение процессам при отключении катушки индуктивности от источника постоянного тока.

61. Объяснить процесс зарядки конденсатора и разрядки конденсатора.

62. Назвать основные направления сбережения электрической энергии.

3 уровень

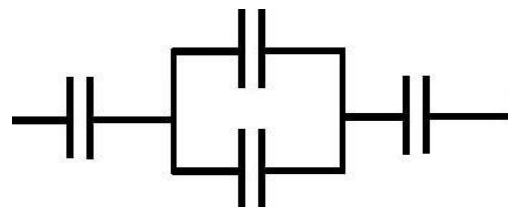
1. Определить силу, приложенную в вакууме двух зарядов $Q_1=0.1 \cdot 10^{-6}$ и $Q_2=0.2 \cdot 10^{-6}$ Кл. если расстояние между ними составляет 10 мм. Для вакуума $\epsilon=1$.

2. Два одинаковых заряда, разделённые стеклянной пластиной толщиной 3 см притягиваются с силой 0.6 Н. Определить величину одного заряда, если для стекла $\epsilon=7$.

3. Какую площадь обкладок имеет воздушный конденсатор, если его ёмкость равна 200 пФ, а расстояние между обкладками составляет 0.4 мм?

4. Общая ёмкость двух параллельно соединённых конденсаторов равна 0.2 мкФ. Ёмкость одного из них 0.05 мкФ. Определить ёмкость второго конденсатора.

5. Определить общую ёмкость соединения, изображённого на рисунке, если $C_1=2$ мкФ, $C_2=4$ мкФ, $C_3=8$ мкФ, $C_4=10$ мкФ.



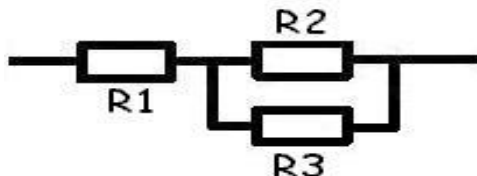
6. Определить проводимость медного провода сечением 4 мм^2 и длиной 800 м. ($\rho_{\text{меди}}=0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$)

7. По резистору сопротивлением 20 Ом течёт ток силой 0.5 А. Определить показание вольтметра, включённого параллельно резистору.

8. Нагревательный элемент сопротивлением $2,3 \text{ Ом}$ питается от аккумулятора. ЭДС которого равна 12В , а внутреннее сопротивление $0,2 \text{ Ом}$. Определить силу тока в цепи.

9. До какой величины ЭДС должен быть заряжен аккумулятор с внутренним сопротивлением $0,8 \text{ Ом}$, чтобы обеспечить нормальную работу электрооборудования, рассчитанного на напряжение 12В и имеющего сопротивление 10 Ом .

10. Резисторы $R_1=15 \text{ Ом}$, $R_2=12 \text{ Ом}$, $R_3=6 \text{ Ом}$ соединены так, как показано на рис. Найти общее сопротивление.



11. Два резистора с сопротивлением $R_1=12 \text{ Ом}$, $R_2=3 \text{ Ом}$ включены параллельно. Найти ток второго резистора, если ток первого резистора $I_1=4 \text{ А}$.

12. Определить, сколько электроэнергии будет израсходовано плиткой за 5 ч. , если она включена в сеть с напряжением 220 В и потребляет ток 3 А .

13. Какую мощность потребляет электронагреватель, рассчитанный на напряжении 110 В и имеющий сопротивление 5 Ом .

14. Мощность на валу электронагревателя составляет 7 кВт . Подсчитать, какую мощность потребляет этот электронагреватель из сети, если его КПД равен 0.85 .

15. Определить индукцию магнитного поля и магнитный поток катушки, состоящей из 400 витков и намотанной на стальной сердечник поперечным сечением $2 \times 4 \text{ см}$. Длина средней силовой линии составляет 20 см . а сила тока в катушке 1.2 А .

16. В магнитное поле с индукцией $B=0,4 \text{ Тл}$ помещён проводник длиной 60 см . Определить величину электромагнитной силы, если по проводнику течёт ток $1,5 \text{ А}$.

17. Какую магнитную индукцию имеет поле, если оно действует с силой $F=12 \text{ Н}$ на проводник длиной 120 см при токе в нём 16 А ?

18. Определить величину индуцированной ЭДС в проводнике длиной 75 см , который перемещается со скоростью 3.2 м/с в магнитном поле с индукцией 2 Тл . перпендикулярно магнитным силовым линиям.

19. Измерительная катушка имеет индуктивность $L=0.5 \text{ Гн}$ В процессе изменения магнитного поля скорость изменения тока в катушке составляет 100 А/с . Определить значение ЭДС самоиндукции, возникающей на зажимах катушки.

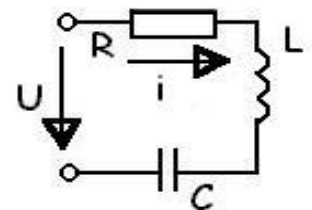
20. На зажимах катушки $L=200 \text{ мГн}$, при равномерном изменении тока в ней. возникает ЭДС 50 мВ . Определить скорость изменения тока в катушке.

21. Металлический проводник перемещается в магнитном поле так, как показано на рисунке. Определить направление ЭДС индукции в проводнике.



22. Определить действующее значение переменной ЭДС, которая индуцируется в рамке, вращающейся в магнитном поле с индукцией $B=0,1 \text{ Тл}$. Активная длина проводника рамки $1,2 \text{ м}$, а скорость перемещения в магнитном поле $v=20 \text{ м/с}$.

23. В цепь переменного тока включено активное сопротивление величиной $5,5\text{ Ом}$. Вольтметр показывает напряжение 220 В . Определить действующее значение тока в цепи.
24. Катушка имеет индуктивность $0,8\text{ Гн}$. Определить индуктивное сопротивление этой катушки при частоте переменного тока 50 Гц , а также при включении её в цепь постоянного тока.
25. Катушка индуктивностью $0,2\text{ Гн}$ включена в цепь переменного тока промышленной частоты. Определить ток в цепи. Активным сопротивлением катушки в цепи пренебрегаем.
26. По катушке с активным сопротивлением 8 Ом и индуктивным сопротивлением 6 Ом течёт ток силой 22 А . Определить активное и индуктивное падение напряжения и напряжение источника.
27. Конденсатор ёмкостью 10 мкФ включён в цепь переменного тока промышленной частоты напряжением 127 В . Определить ток в цепи.
28. Определить ёмкостное сопротивление конденсатора ёмкостью 10 мкФ , который включён в цепь переменного тока частотой 100 кГц .
29. В цепь напряжением 220 В включены последовательно конденсатор и активное сопротивление. Сопротивление конденсатора $X_c=30\text{ Ом}$. Найти активное падение напряжения, если ток в цепи равен $4,4\text{ А}$.
30. Активное сопротивление $R=120\text{ Ом}$ и ёмкостное сопротивление 20 Ом включены последовательно в цепь переменного тока напряжением 127 В . Определить ток в цепи.
31. От источника переменного тока напряжением 220 В питается последовательная цепь, состоящая из активного сопротивления $R=20\text{ Ом}$, индуктивного $X_L=120\text{ Ом}$ и ёмкостного $X_c=64\text{ Ом}$. Определить ток в цепи.
32. Полная мощность электрической цепи составляет 750 ВА . Приёмник электроэнергии имеет активное сопротивление 30 Ом и индуктивное сопротивление 120 Ом . Определить коэффициент мощности цепи и её активную мощность.
33. Обмотки трёхфазного генератора соединены в звезду и каждая из них создаёт напряжение 127 В . Приёмник состоит из трёх одинаковых катушек, имеющих активное сопротивление 10 Ом каждая. Определить линейное напряжение, линейный и фазный ток.
34. Три одинаковых приёмника с активным сопротивлением 30 Ом и индуктивным сопротивлением 18 Ом соединены в треугольник и питаются от сети с линейным напряжением 380 В . Определить фазное напряжение, линейный и фазный токи, коэффициент мощности цепи.
35. Обмотки трёхфазного асинхронного электродвигателя имеют активное сопротивление 25 Ом каждая. Линейное напряжение сети 380 В . Определить коэффициент мощности двигателя.
36. К линейной цепи (см. рис.) с параметрами $R=100\text{ Ом}$, $L=0,02\text{ Гн}$, $C=2\text{ мкФ}$, приложено синусоидальное напряжение $u=250\sin(1000t + 180\sin(3000t+15)) + 130\sin 5000t$. Определить полное сопротивление гармоник.



37. В линейной цепи протекает синусоидальный ток $i=1,8\sin(1000t+15) + 1,1\sin2000t$. Параметры цепи: $R=8$ Ом, $L=0,008$ Гн, $C=100$ мкФ. Определить углы сдвига фаз для 1-ой и 2-ой гармоник. Записать мгновенное значение напряжения, приложенного к этой цепи.

38. Параметр цепи изображённой на рисунке, $R=6$ Ом, $L=3$ Гн, $U=120$ В. Определить значение тока в цепи через 2 с после замыкания ключа.

