

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И МОЛОДЕЖНОЙ ПОЛИТИКИ
СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ
«БОГДАНОВИЧСКИЙ ПОЛИТЕХНИКУМ»**

ОП.02 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА (часть 1)

**Методические указания и контрольные задания для студентов
заочной формы обучения
по специальности 13.02.11**

«Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям)»

**Богданович
2022**

Методические указания составлены для студентов заочной формы обучения для специальности 13.02.11 «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям)»

Методические указания содержат описание теоретических вопросов, практических и самостоятельных работ, вопросов для подготовки к экзамену, а также указания по выполнению контрольных работ.

Составитель:

Кудряшова Т.А., преподаватель высшей квалификационной категории ГАПОУ СО «Богдановичский политехникум».

Рассмотрено методическим советом ГАПОУ СО «Богдановичский политехникум»

Протокол № от «__»_____2022 г.

Председатель _____/Е.В. Снежкова/

СОДЕРЖАНИЕ

Пояснительная записка	4
1 Общие методические указания	6
2 Структура и содержание 1 части учебной дисциплины	8
Введение	9
Раздел 1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА	9
Тема 1.1 Начальные сведения об электрическом поле	9
Тема 1.2 Электрический ток	10
Тема 1.3 Электрическая цепь.	11
Тема 1.4 Расчет электрических цепей постоянного тока	12
Тема 1.5 Нелинейные электрические цепи постоянного тока	13
Тема 1.6 Расчет электрических полей	14
Тема 1.7 Магнитное поле	15
Тема 1.8 Магнитные цепи	16
Тема 1.9 Электромагнитная индукция	16
Тема 1.10 Начальные сведения о переменном токе	17
Тема 1.11 Элементы и параметры цепей переменного тока	18
Тема 1.12 Расчет электрических цепей переменного тока с помощью векторных диаграмм.	19
Тема 1.13 Символический метод расчета электрических цепей переменного тока.	20
Тема 1.14 Электрические цепи с взаимной индуктивностью	21
Тема 1.15 Резонанс в электрических цепях	21
Тема 1.16 Режимы работы трехфазных потребителей	22
3 Методические указания к контрольной работе	25
Методические указания к решению задачи 1	25
Методические указания к решению задачи 2	31
Методические указания к решению задачи 3	37
ПРИЛОЖЕНИЕ А Индивидуальные задания для контрольной работы	41
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Перечень экзаменационных вопросов	46
ПРИЛОЖЕНИЕ В Список рекомендуемых источников информации	50

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная дисциплина ОП.02 «Электротехника и электроника» является частью общепрофессионального цикла основной профессиональной образовательной программы по специальности 13.02.11 «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям)».

Программа первой части дисциплины предусматривает изучение физических процессов, связанных с электрическими и магнитными полями, и основных методов расчета электрических и магнитных полей, электрических и магнитных цепей постоянного и переменного токов. В методических указаниях приведены примеры расчета электрических цепей.

Преподавание дисциплины базируется на предшествующем изучении общеобразовательных предметов: физики, химии, математики, имеет практическую направленность и проводится в тесной взаимосвязи с другими общепрофессиональными дисциплинами и профессиональными модулями: ОП.03 «Метрология, стандартизация и сертификация», ОП.05 «Материаловедение», ОП.06 «Информационные технологии в профессиональной деятельности», ОП.08 «Охрана труда», ОП.09 «Безопасность жизнедеятельности», ОП.10 «Основы энергосбережения», ПМ.01 «Организация простых работ по техническому обслуживанию и ремонту электрического и электромеханического оборудования», ПМ.02 «Выполнение сервисного обслуживания бытовых машин и приборов», ПМ.04 «Выполнение работ по одной или нескольким профессиям рабочих, должностям служащих».

Изучение учебной дисциплины предполагает подготовку будущих специалистов для работы на предприятиях региона. Кроме того, знания, полученные по дисциплине, позволяют расширить знания по другим смежным дисциплинам.

Изучение учебной дисциплины предусматривает самостоятельную подготовку студентов с целью овладения теоретическими знаниями и практическими навыками.

Программой предусмотрено выполнение контрольной работы (приложение А), практических заданий, лабораторных работ, а также сдача экзамена (приложение Б). К экзамену допускаются студенты, получившие «зачет» по контрольной, лабораторным и практическим работам. Лабораторные и практические работы выполняются во время экзаменационных сессий под руководством преподавателя, а контрольная работа – в межсессионный период самостоятельно.

В рамках программы учебной дисциплины обучающимися осваиваются умения и знания

Код ПК, ОК	Умения	Знания
ПК 1.1 – ПК 1.4 ПК 2.1 – ПК 2.3 ПК 4.3 ОК 01 - ОК 10	<ul style="list-style-type: none"> - подбирать электрические приборы и оборудование с определенными параметрами и характеристиками; - правильно эксплуатировать электрооборудование; - рассчитывать параметры электрических, магнитных цепей; - снимать показания электроизмерительных приборов и приспособлений и пользоваться ими; - собирать электрические схемы; - читать принципиальные, электрические и монтажные схемы; - составлять по заданным условиям или с натуры расчетные схемы трехфазных электрических цепей при различной нагрузке и в разных режимах работы; - строить векторные диаграммы цепей переменного тока; - применять топографические диаграммы для расчета трехфазных электрических цепей; 	<ul style="list-style-type: none"> - методы расчета и измерения основных параметров электрических, магнитных цепей; - основные законы электротехники; - основные правила эксплуатации электрооборудования и методы измерения электрических величин; - основы теории электрических машин, принцип работы типовых электрических устройств; - основы физических процессов в проводниках, полупроводниках и диэлектриках; - параметры электрических схем и единицы их измерения; - принципы выбора электрических устройств и приборов; - принципы действия, устройство, основные характеристики электротехнических устройств и приборов; - свойства проводников, полупроводников, электроизоляционных, магнитных материалов; - способы получения, передачи и использования электрической энергии; - характеристики и параметры электрических и магнитных полей; - методику построения электрических цепей; - режимы работы трехфазных цепей; - порядок построения векторных диаграмм цепей переменного тока

1 ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Для студента-заочника основным методом изучения дисциплины является самостоятельная работа с источниками информации. Учеба должна быть систематической и проводиться по индивидуальному плану, составленному самим заочником в соответствии с учебным графиком.

При изучении дисциплины, необходимо понять физическую сущность явлений, усвоить основные понятия об электрических величинах, а также закономерности, определяющие связь и зависимость между ними, научиться производить расчеты.

Серьезное внимание должно быть уделено вопросам для самопроверки, а также разбору решений типовых задач, помещенных в настоящем пособии (см. методические указания с примерами решения типовых задач)

Цель контрольной работы

Целью контрольной работы является развитие у студентов самостоятельного творческого мышления в области теории и расчета электрических цепей.

Знание и понимание дисциплины, умение применять свои знания на практике, а главное, самостоятельное творческое мышление студента наиболее полно выявляется при решении им специально подобранных задач. Поэтому для каждого студента умение решать задачи является одним из главных требований при изучении дисциплины.

К решению каждой задачи контрольной работы следует приступать только после изучения соответственного раздела теоретического курса в объеме учебной программы.

Перед самостоятельным решением задачи контрольного задания рекомендуется разобрать ход решения нескольких типовых задач.

При таком подходе к изучению дисциплины знание и понимание дисциплины трансформируется в специфическое сознание и развивается самостоятельное аналитическое творческое мышление.

Требования к выполнению и оформлению контрольной работы.

1. Студенты специальности 13.02.11 по 1 части учебной дисциплины ОП.02 «Электротехника и электроника» выполняют одну контрольную работу
2. Номер варианта соответствует порядковому номеру в учебном журнале.
3. Контрольная работа выполняется в отдельной ученической тетради в клетку или на формате А4 в рукописном или машинном варианте, на обложке которой должны быть написаны: название контрольной работы, фамилия, имя, отчество студента.
4. На каждой странице должны быть оставлены поля шириной не менее 3 см. для замечаний рецензента, а в конце тетради 2-3 страницы для рецензии и работы

над ошибками. При оформлении контрольной работы студент должен пользоваться только черными или синими чернилами.

5. Приступая к решению задачи, студент должен изучить ее условие; уяснить, какие величины являются заданными и какие искомыми; записать условие задачи полностью без сокращений; вычертить электрическую схему, соответствующую условию задачи, и показать на ней заданные и искомые величины, а также направление токов. Контрольное задание выполняется чернилами, графическая часть задания (схемы, кривые, векторные диаграммы) – карандашом с применением чертежных инструментов. При выполнении схем необходимо пользоваться условными графическими обозначениями, установленными ГОСТами.

6. Решение задач сопровождаются краткими пояснениями.

7. Текст, формулы, числовые выкладки должны быть четкими без помарок. Цифровая подстановка в уравнении должна даваться один раз без промежуточных сокращений и расчетов. Численное значение каждого символа должно обязательно занимать то же место в формуле, что и сам символ. Все расчеты необходимо вести в системе СИ. Буквенные обозначения единиц измерения ставятся только возле окончательного результата и в скобки не заключаются, например, 120 В, 13 А, 100 Вт.

8. В конце контрольной работы необходима подпись автора и дата выполнения работы и список литературы, которым пользовался студент при выполнении домашней контрольной работы.

9. Если контрольное задание не зачтено, студент обязан исправить ошибки, указанные преподавателем, и представить его на повторную рецензию. При возникновении затруднений при выполнении контрольной работы, студент может обратиться в техникум, для получения консультации.

10. Контрольная работа, выполненная не в полном объеме, не по заданному варианту, небрежно, неразборчивым почерком возвращаются студенту без рецензии, с указанием причин возврата на титульном листе.

11. Студенты, не сдавшие на проверку до начала сессии соответствующих решенных контрольных заданий и не имеющих зачет по лабораторным и практическим работам к сдаче экзамена не допускаются.

2 СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ 1 ЧАСТИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1 Структура учебной дисциплины

Наименование разделов и тем	Всего аудиторных часов	Аудиторные занятия		Самост. работа
		в том числе		
		Лаборат. занятия	Практ. занятия	
Введение				1
Тема 1.1 Начальные сведения об электрическом поле				2
Тема 1.2 Электрический ток	1			6
Тема 1.3 Электрическая цепь	2,5	2		6
Тема 1.4 Расчет электрических цепей постоянного тока	4,5	2		20
Тема 1.5 Нелинейные электрические цепи постоянного тока				4
Тема 1.6 Расчет электрических полей				6
Тема 1.7 Магнитное поле	1			5
Тема 1.8 Магнитные цепи				6
Тема 1.9 Электромагнитная индукция	1			7
Тема 1.10 Начальные сведения о переменном токе	0,5			2
Тема 1.11 Элементы и параметры цепей переменного тока	0,5			2
Тема 1.12 Расчет электрических цепей переменного тока с помощью векторных диаграмм.	3	2		12
Тема 1.13 Символический метод расчета электрических цепей переменного тока	2		2	10
Тема 1.14 Электрические цепи с взаимной индуктивностью				4
Тема 1.15 Резонанс в электрических цепях	4	4		2
Тема 1.16 Режимы работы трехфазных потребителей	8	2	2	26
Подготовка к промежуточной аттестации				2
ИТОГО:	28	12	4	123

Таблица 3 - Перечень практических занятий

№ темы	Темы практических работ	Кол-во часов
1.13	Расчет электрических цепей переменного тока символическим методом	2
1.16	Расчет смешанного соединения обмоток генератора и фаз приемника	2
	ИТОГО	4

Таблица 4 – Перечень лабораторных работ

№ темы	Темы лабораторных работ	Кол-во часов
1.3	Проверка закона Ома при последовательном соединении приемников электрической энергии	2
1.4	Исследование параллельного соединения приемников энергии. Проверка первого закона Кирхгофа	2
1.12	Определение работы и мощности в цепях однофазного переменного тока	2
1.15	Исследование последовательного соединения активного сопротивления, индуктивности и емкости (резонанс напряжений)	2
1.15	Исследование параллельного соединения индуктивного и емкостного сопротивлений (резонанс токов)	2
1.16	Измерение мощности в трехфазной цепи при различной нагрузке	2
	ИТОГО	12

2.2 Содержание учебной дисциплины

Введение

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- историю электрификации России, современное состояние и перспективы развития электроэнергетики;
- способы получения, передачи и использования электрической энергии;

Самостоятельная внеаудиторная работа

Основные этапы развития отечественной электроэнергетики, электротехники и электроники. Перспективы развития электроэнергетики, электротехники и электроники РФ. Основное содержание учебной дисциплины "Электротехника и электроника", ее значение в подготовке к освоению новой техники, робототехники, прогрессивных технологий, станков ЧПУ и автоматических линий; ее связь с другими учебными дисциплинами.

Тема 1 Начальные сведения об электрическом поле

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- характеристики и параметры электрического поля;
- основные электрические явления, их физическую сущность и возможности их практического использования;
- основы физических процессов в проводниках, полупроводниках и диэлектриках;
- наиболее употребляемые термины и определения электротехники.

Самостоятельная внеаудиторная работа

Элементарные частицы и их электромагнитное поле, как особая форма материи, его составляющие. Электростатическое поле. Закон Кулона. Основные свойства и характеристики электрического поля: напряженность, потенциал, напряжение. Проводники в электрическом поле. Электрическая емкость.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется электрическим полем?
2. Что называется напряженностью электрического поля?
3. От каких величин зависит сила взаимодействия электрических зарядов?
4. Что представляет собой электрический потенциал?
5. В чем отличие проводников от диэлектриков?
6. Как изменится сила взаимодействия между двумя заряженными телами с зарядами Q и q если при $q = \text{const}$, заряд Q увеличить в 2 раза, причем расстояние между зарядами также удвоится?
7. Как изменится сила взаимодействия между двумя заряженными телами, если разделяющий их воздух заменить дистиллированной водой?

Тема 2 Электрический ток

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- физические процессы возникновения электрического тока;
- разновидности электрического тока;
- свойства проводников, полупроводников, электроизоляционных, магнитных материалов

Электрический ток в проводниках: величина и направление тока проводимости, плотность тока. Проводимости. Удельная электрическая проводимость и сопротивление, электрическая проводимость и сопротивление проводников. Закон Ома для участка цепи. Зависимость сопротивления от температуры. Способы соединения сопротивлений.

Самостоятельная внеаудиторная работа

Электропроводимость. Классификация веществ по электропроводимости. Зонная теория проводимости. Физическое явление электрического тока и его разновидности: ток проводимости, ток переноса, ток смещения. Электрический ток в проводниках: величина и направление тока проводимости, плотность тока

Проводимости. Тепловое действие тока. Закон Джоуля-Ленца. Принцип действия нагревательных приборов, предохранителей. Принципы выбора сечения проводников.

Электрический ток в вакууме, газах. Электрический ток в полупроводниках. Электрические свойства полупроводников. Явления в контакте двух металлов.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется электрическим током?
2. При каких условиях электрический ток может поддерживаться в вакууме?
3. Что называется работой выхода электронов?
4. Объясните явление термоэлектронной эмиссии.
5. В чем состоит явление фотоэлектронной эмиссии?
6. Что такое вторичная эмиссия, автоэлектронная эмиссия?
7. Какие вещества относятся к полупроводникам?
8. В чем состоит основная особенность электрической проводимости полупроводников по сравнению с металлами?
9. Как влияют на электрическую проводимость полупроводников примеси?
10. Объясните возникновение контактной разности потенциалов на контакте двух металлов или двух полупроводников.
11. Как читается и записывается закон Ома для участка и всей цепи?
12. Что называется электрическим сопротивлением?
13. От каких величин зависит сопротивление проводника?
14. От чего зависит количество тепла, выделяемое током в проводнике?

Тема 3 Электрическая цепь

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- классификацию простых и сложных электрических цепей постоянного тока;
- параметры электрических схем и единицы их измерения;
- принципы выбора электрических устройств и приборов;
- основные законы электротехники.

уметь:

- подбирать электрические приборы и оборудование с определенными параметрами и характеристиками;
- правильно эксплуатировать электрооборудование;
- читать принципиальные, электрические и монтажные схемы;
- собирать электрические схемы;
- снимать показания электроизмерительных приборов и приспособлений и пользоваться ими.

Закон Ома для полной цепи. Баланс мощностей для электрической цепи

Лабораторная работа №1: Определение работы и мощности цепи постоянного тока

Самостоятельная внеаудиторная работа

Элементы электрической цепи, их классификация. Физические процессы в источнике при разомкнутой и при замкнутой цепи. Режимы работы электрической цепи. Работа источника электрической энергии в режиме генератора и потребителя. Простые и сложные электрические цепи. Мощность и коэффициент полезного действия источника и приемника. Схемы замещения электрических цепей. Элементы схемы электрической цепи: ветвь, узел, контур. Пассивные и активные элементы электрической цепи.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое электрическая цепь?
2. Какие существуют источники питания?
3. Каково различие между ЭДС и напряжением источника?
4. Что называется мощностью электрического тока, в каких единицах она измеряется?
5. По каким формулам можно подсчитать работу электрического тока?
6. Что такое баланс мощностей в замкнутой электрической цепи?
7. Как читается и записывается закон Ома для всей цепи?

Тема 4 Расчет электрических цепей постоянного тока

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- основные методы расчета и измерения электрических цепей постоянного тока;
- основные правила эксплуатации электрооборудования

уметь:

- составлять электрическую цепь, обеспечивающую выполнение заданной задачи;
- выполнять расчеты электрических цепей постоянного тока;
- подбирать электрические приборы и оборудование с определенными параметрами и характеристиками;
- правильно эксплуатировать электрооборудование;
- читать принципиальные, электрические и монтажные схемы;
- собирать электрические схемы;
- снимать показания электроизмерительных приборов и приспособлений и пользоваться ими.
- анализировать полученные результаты.

Законы Кирхгофа. Методы расчета сложных электрических цепей

Лабораторная работа №2: Исследование параллельного соединения приемников электрической энергии Проверка закона Кирхгофа

Самостоятельная внеаудиторная работа

Неразветвленная электрическая цепь. Последовательное соединение пассивных элементов, эквивалентное соединение резисторов. Потери напряжения в проводах. Последовательное соединение источников ЭДС. Потенциальная диаграмма неразветвленной электрической цепи

Разветвленная электрическая цепь с двумя узлами. Параллельное соединение пассивных элементов, эквивалентное соединение резисторов. Смешанное соединение пассивных элементов.

Алгоритм расчета электрической цепи постоянного тока методом узловых и контурных уравнений, контурных токов, методом узлового напряжения и методом наложения

Выполнить индивидуальное задание по теме: Расчет сложных электрических цепей

Вопросы для самоконтроля

1. Какими свойствами характеризуется последовательное соединение сопротивлений?
2. Какими свойствами характеризуется параллельное соединение сопротивлений?
3. Сформулируйте первый закон Кирхгофа.
4. Как определить эквивалентное сопротивление при параллельном соединении?
5. Что такое сложная цепь?
6. Сформулируйте второй закон Кирхгофа
7. Составьте алгоритм расчета сложной электрической цепи методом эквивалентных сопротивлений (методом контурных токов, методом узловых и контурных уравнений, методом наложения)

Тема 5 Нелинейные электрические цепи постоянного тока

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- основные типы нелинейных элементов и их использование в электрических цепях.
- основные формы вольтамперных характеристик нелинейных элементов;
- способы расчета электрических цепей с нелинейными элементами.

уметь:

- производить расчет и графическое построение вольтамперных характеристик нелинейных электрических цепей.

Самостоятельная внеаудиторная работа

Нелинейные элементы электрических цепей постоянного тока. Практическое применение нелинейных элементов. Вольт-амперная характеристика нели-

нейных элементов. Статическое и динамическое сопротивление нелинейных элементов.

Графический расчет нелинейных электрических цепей постоянного тока.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие элементы называются нелинейными?
2. Поясните, что представляет собой вольт-амперная характеристика нелинейного элемента.
3. Что называется статическим и динамическим сопротивлениями нелинейного элемента?
4. Что представляет собой нелинейный активный двухполюсник?
5. Поясните, как рассчитывают электрическую цепь с параллельным соединением нелинейных элементов.
6. Составьте алгоритм расчета электрической цепи с последовательным соединением нелинейных элементов.

Тема 6 Расчет электрических полей

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- характеристики и параметры электрического поля
- основные законы взаимодействия заряженных частиц.

уметь:

- выполнять расчеты основных характеристик электрического поля.

Самостоятельная внеаудиторная работа

Цели и задачи расчета, электрических полей. Применение закона Кулона для расчета электрического поля. Электрическое поле в однородном диэлектрике. Поляризация диэлектрика. Электрическое смещение. Диэлектрическая проницаемость.

Электрическая емкость. Энергия электрического поля конденсатора. Применение многослойной изоляции. Электрический пробой и электрическая прочность диэлектрика. Электрическое поле на границе двух сред с различными величинами диэлектрической проницаемости. Использование электрического поля в промышленных установках

Вопросы для самоконтроля

1. От каких величин зависит сила взаимодействия электрических зарядов?
2. Как изменится сила взаимодействия между двумя заряженными телами с зарядами Q и q если при ($q = \text{const}$) заряд Q увеличить в 2 раза, причем расстояние между зарядами также удвоится?
3. Как изменится сила взаимодействия между двумя заряженными телами

ми, если разделяющий их воздух заменить дистиллированной водой?

4. От каких величин зависит емкость плоского конденсатора?
5. Каким образом изменяется напряжение на обкладках конденсатора при его заряде и разряде?

Тема 7 Магнитное поле

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- принципы создания магнитных полей и построение магнитных полей;
- принцип действия электроустановок и аппаратов с использованием магнитных полей.
- основные характеристики магнитного поля;
- свойства магнитных материалов.

уметь:

- рассчитывать параметры магнитных цепей

Основные свойства и характеристики магнитного поля. Проводник с током в магнитном поле. Принцип действия электромагнитных механизмов и устройств.

Самостоятельная внеаудиторная работа

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле. Индуктивность собственная и взаимная. Коэффициент магнитной связи.

Магнитные свойства вещества. Намагничивание и намагниченность веществ. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость вещества. Закон полного тока, его применение для расчета магнитных полей. Магнитное поле на границе двух сред с разными величинами магнитной проницаемости. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис. Основная кривая намагничивания. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется магнитным полем, как оно себя проявляет?
2. Как определить направление магнитного поля, возбужденного вокруг проводника с током?
3. Что называется напряженностью магнитного поля?
4. Что называется магнитной индукцией, магнитным потоком?
5. Что такое абсолютная и относительная магнитная проницаемость?
6. Как разделяются вещества по магнитным свойствам?
7. Какие материалы относятся к ферромагнитным и как объясняется их намагничивание?
8. Какие процессы возникают при перемагничивании стали?
9. В чем сущность магнитного гистерезиса?

10. Определите магнитный поток, пронизывающий сердечник, если магнитная индукция стали 1,5 Тл, площадь поперечного сечения сердечника, изготовленного из той стали, 0,003 м².

11. Вычислите магнитную индукцию поля, если оно действует на проводник с силой 6 Н. Рабочая длина проводника, помещенного в магнитное поле, составляет 60 см, а ток, протекающий в нем, равен 15 А.

Тема 8 Магнитные цепи

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- классификацию магнитных цепей и области применения;
- закон полного тока и его применение для расчета параметров магнитных цепей;
- основные методы расчета магнитных цепей.

Самостоятельная внеаудиторная работа

Магнитные цепи, цели и задачи расчета магнитных цепей. Магнитное сопротивление. Применение закона полного тока для расчета параметров магнитной цепи. Алгоритм расчета неразветвленной и разветвленной магнитной цепи

Вопросы для самоконтроля

1. Как формулируется правило левой руки?
2. Сформулируйте закон полного тока.
3. Объясните взаимодействие проводников с током.
4. Что такое электромагнит?
5. От каких параметров зависит магнитное сопротивление?
6. Чем отличается электромагнит от постоянного магнита?

Тема 9 Электромагнитная индукция

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- основы теории электрических машин, принцип работы типовых электрических устройств;
- принципы действия, устройство, основные характеристики электротехнических устройств и приборов

уметь:

- рассчитывать параметры ЭДС индукции, самоиндукции.

Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле. Явление и ЭДС самоиндукции, Явление и ЭДС взаимной индукции

Самостоятельная внеаудиторная работа

Взаимное преобразование механической и электрической энергии. Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока Принцип работы трансформатора. Вихревые токи. их использование и способы ограничения

Энергия магнитного поля катушки с током. Энергия магнитного поля в системе магнитно-связанных контуров (катушек). Индуктивность в системе магнитно-связанных катушек. Выражение энергии через характеристики магнитного поля.

Механические силы в магнитном поле. Энергетический баланс в электромагнитной системе. Обобщенное выражение электромагнитной силы. Тяговое усилие электромагнита. Сила взаимодействия двух параллельных проводов с токами. Применение закона электромагнитной индукции в практике.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается сущность электромагнитной индукции?
2. Проводник длиной 0,3 м перемещается перпендикулярно магнитным силовым линиям ($B = 10$ Тл) с скоростью 1 м/с. Определите ЭДС индукции в проводнике.
3. Поясните принцип работы генератора
4. Поясните принцип работы двигателя.
5. В чем сущность явления самоиндукции?
6. В катушке, обладающей индуктивностью 5 Гн, протекает ток, сила которого изменяется за 2 с на 10 А. Определите ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке.
7. Поясните принцип работы трансформатора.
8. От чего зависит электромагнитная сила, действующая на проводник с током в магнитном поле?
9. Что такое вихревые токи?
10. В чем заключается вредное влияние вихревых токов и какие Вы знаете способы их ограничения.
11. Приведите примеры использования вихревых токов

Тема 10 Начальные сведения о переменном токе

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- принципы получения синусоидально изменяющихся электрических параметров;
- основные способы аналитического и графического представления синусоидальных электрических величин.

Получение синусоидальной ЭДС. Понятие о генераторах переменного то-

ка. Уравнения и графики синусоидальных величин. Действующее и среднее значения ЭДС, напряжения, тока. Изображение синусоидальных величин с помощью временных и векторных диаграмм.

Самостоятельная внеаудиторная работа

Принцип действия и конструкция генератора переменного тока. Характеристики синусоидальных величин

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется мгновенным и амплитудным значениям переменной величина?
2. Что называется периодом и частотой переменного тока?
3. Чем характеризуется синусоидальная величина?
4. Что называется начальной фазой?
5. В каком случае синусоидальные величины совпадают по фазе?
6. Что называется действующим значением переменной величины?
7. Что такое векторная диаграмма?

Тема 11 Элементы и параметры цепей переменного тока

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- принципы построения электрических цепей переменного тока с различными видами и параметрами нагрузки;
- порядок построения векторных диаграмм цепей переменного тока

уметь:

- составлять электрическую цепь переменного тока для решения заданной задачи.

Цепь переменного тока с реальной катушкой индуктивности. Цепь переменного тока с реальным конденсатором.

Самостоятельная внеаудиторная работа

Элементы и параметры электрической цепи переменного тока. Идеальные цепи переменного тока: напряжение, ток, мощность, векторные диаграммы. Треугольники напряжений, сопротивлений, мощности.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие сопротивления в цепи переменного тока Вам известны? '
2. От чего зависит индуктивное сопротивление?
3. От каких величин зависит емкостное сопротивление?

4. Что такое полное сопротивление неразветвленной цепи переменного тока?
5. Как определяются и в каких единицах измеряются активная, реактивная и полная мощности переменного тока?

Тема 12 Расчет электрических цепей переменного тока с помощью векторных диаграмм

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- о влиянии различных величин параметров нагрузки на конфигурацию векторных диаграмм, на коэффициент мощности.
- основы зависимости для расчета параметров векторных диаграмм;
- методику построения электрических цепей;
- правила построения векторных диаграмм для неразветвленных и разветвленных электрических цепей;
- основные правила эксплуатации электрооборудования.

уметь:

- выполнять построение векторных диаграмм для электрических цепей различной структуры и состава элементов нагрузки;
- подбирать электрические приборы и оборудование с определенными параметрами и характеристиками;
- правильно эксплуатировать электрооборудование;
- читать принципиальные, электрические и монтажные схемы;
- собирать электрические схемы;
- снимать показания электроизмерительных приборов и приспособлений и пользоваться ими.

Неразветвленные и разветвленные цепи однофазного переменного тока

Лабораторная работа №3 Определение работы и мощности в цепи однофазного переменного тока

Самостоятельная внеаудиторная работа

Расчет неразветвленной и разветвленной цепи переменного тока с произвольным числом активных и реактивных элементов. Построение топографической диаграммы. Расчет разветвленной цепи с двумя узлами с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью при различных соотношениях величин реактивных проводимостей. Треугольники токов, проводимостей, мощностей. Энергетический процесс в цепи. Методы увеличения коэффициента мощности и его влияние на технико-экономические показатели электрических цепей.

Выполнение индивидуальных заданий по теме: Расчет электрических цепей однофазного переменного тока

Вопросы для самоконтроля

1. Какие сопротивления в цепи переменного тока Вам известны? '
2. От чего зависит индуктивное сопротивление?
3. От каких величин зависит емкостное сопротивление?
4. Что такое полное сопротивление неразветвленной цепи переменного тока?
5. Как определяются и в каких единицах измеряются активная, реактивная и полная мощности переменного тока?
6. Начертите векторную диаграмму для неразветвленной цепи с R и $X_L > X_C$.
7. Что такое коэффициент мощности?

Тема 13 Символический метод расчета электрических цепей переменного тока

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- основные законы для цепей переменного тока: Ома, Кирхгофа;
- способы представления электрических величин на комплексной плоскости с помощью комплексных чисел.

уметь:

- рассчитывать электрические цепи переменного тока символическим методом;
- строить векторные диаграммы цепей переменного тока

Практическое занятие 1 Выполнение действий над комплексными числами Расчет электрических цепей переменного тока символическим методом

Самостоятельная внеаудиторная работа

Выполнение действий над комплексными числами. Выражение характеристик электрических цепей комплексными числами.

Выполнение индивидуального задания: Расчет сложных электрических цепей переменного тока с применением комплексных чисел

Вопросы для самоконтроля

1. Как в комплексной форме выражаются активное и реактивные сопротивления? '
2. Как в комплексной форме определяются мощности?
3. Приведите пример арифметических действий с комплексными числами, если $\dot{A} = 12 + j10$ и $\dot{B} = 5 + j3$?
4. Запишите выражение $i = 20\sin(\omega t - 30^\circ)$ в комплексной форме.

5. Заданы комплексные значения напряжения и тока электрической цепи $\dot{U} = (-20 - j40)$ В и $\dot{I} = (-8 + j6)$ А, Запишите эти значения в показательной форме и постройте для них векторную диаграмму

6. Комплексные действующие значения напряжения и тока нагрузки равны $\dot{U} = (60 + j80)$ В и $\dot{I} = (8 + j6)$ А, Найдите активные и реактивные составляющие напряжения и тока

7. Комплексные действующие значения напряжения и тока нагрузки равны $\dot{U} = j100$ В и $\dot{I} = (16 + j12)$ А, Найдите активное и реактивное сопротивления, активную и реактивную мощности нагрузки.

Тема 14 Электрические цепи с взаимной индуктивностью

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- основные законы для цепей переменного тока: Ома, Кирхгофа;
- методику расчета электрических цепей с взаимной индуктивностью.

Самостоятельная внеаудиторная работа

Согласное и встречное включение элементов с взаимной индуктивностью в электрических цепях. Взаимоиндуктивное сопротивление. Знаки ЭДС и напряжения, обусловленные взаимной индуктивностью. Взаимоиндуктивное сопротивление. Методика расчета электрических цепей с взаимной индуктивностью.

Трансформатор без ферромагнитного сердечника: векторная диаграмма воздушного трансформатора, вносимые сопротивления, эквивалентная схема замещения

Вопросы для самоконтроля

1. Какое включение элементов с взаимной индуктивностью называется согласным и встречным?
2. Запишите комплексные индуктивное и взаимоиндуктивное сопротивления.
3. Приведите схему последовательного соединения катушек и составьте для этого контура уравнение по 2 закону Кирхгофа
4. Приведите схему параллельного соединения катушек и составьте для этого контура уравнение по 2 закону Кирхгофа
5. Запишите формулы для определения вносимых сопротивлений воздушного трансформатора

Тема 15 Резонанс в электрических цепях

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- о физических процессах, происходящих в электрических цепях пере-

менного тока с различными нагрузками;

- условия резонансов напряжений и тока;
- основные правила эксплуатации электрооборудования

уметь:

- подбирать электрические приборы и оборудование с определенными параметрами и характеристиками;
- правильно эксплуатировать электрооборудование;
- читать принципиальные, электрические и монтажные схемы;
- собирать электрические схемы;
- снимать показания электроизмерительных приборов и приспособлений и пользоваться ими.
- обрабатывать и анализировать результаты расчетов и экспериментов

Лабораторная работа №4 Исследование последовательного соединения активного сопротивления, индуктивности и емкости (резонанс напряжений)

Лабораторная работа №5 Исследование параллельного соединения индуктивного и емкостного сопротивлений (резонанс токов)

Самостоятельная внеаудиторная работа

Влияние величины различных нагрузок в цепях переменного тока на изменение векторных диаграмм элементов и цепей переменного тока. Резонанс напряжений: условия, признаки резонанса напряжений, резонансная частота, волновое сопротивление, добротность контура, частотные характеристики.

Резонанс токов: условия, признаки резонанса напряжений, резонансная частота, волновое сопротивление, добротность контура, частотные характеристики. Практическое значение и использование резонансных контуров.

Вопросы для самоконтроля

1. Поясните характеристики колебательного контура
2. При каких условиях в цепи возникает резонанс напряжений?
3. Что представляет собой «добротность контура»
4. Перечислите условия возникновения резонанса токов
5. Как определить общий ток в разветвленной цепи переменного тока?
6. Поясните, в чем заключается влияние величины реактивной мощности на технико-экономические показатели электроустановок
7. Какие способы повышения коэффициента мощности Вы знаете?

Тема 16 Режимы работы трехфазных потребителей

В результате изучения темы студент должен:

знать:

- принципы получения трехфазной ЭДС переменного тока;
- принципы построения и конструкции трехфазных генераторов переменного тока и трехфазных приемников электрической энергии.
- основные закономерности расчета трехфазных цепей;
- основные виды нагрузок трехфазных цепей и способы их соединения;
- методы расчета параметров трехфазных цепей;
- основные правила эксплуатации электрооборудования.
- режимы работы трехфазных цепей;
- порядок построения векторных диаграмм цепей переменного тока

уметь:

- подбирать параметры и составлять по заданным условиям или с натуры трехфазные электрические цепи при различной нагрузке и в разных режимах работы;
- рассчитывать параметры трехфазной цепи;
- применять топографические диаграммы для расчета трехфазных электрических цепей;
- подбирать электрические приборы и оборудование с определенными параметрами и характеристиками;
- правильно эксплуатировать электрооборудование;
- читать принципиальные, электрические и монтажные схемы;
- собирать электрические схемы;
- снимать показания электроизмерительных приборов и приспособлений и пользоваться ими.

Трёхфазные симметричные цепи. Получение трехфазной ЭДС. Виды соединения фаз трехфазных генераторов и потребителей. Мощность трехфазных цепей. Измерение мощности и энергии в цепях трехфазного тока.

Методика расчета трехфазной цепи при симметричной нагрузке при соединении обмоток генератора и фаз приемника «звездой» и «треугольником». Векторная диаграмма.

Лабораторная работа №6 Измерение мощности в трехфазной цепи при различной нагрузке

Практическое занятие №2 Расчет смешанного соединения обмоток генератора и фаз приемников энергии.

Самостоятельная внеаудиторная работа

Симметричная и несимметричная нагрузка в трехфазной цепи при соединении обмоток генератора и фаз приемника электрической энергии звездой и треугольником. Фазные, линейные напряжения и токи, соотношения между ними. Векторные диаграммы.

Несимметричная нагрузка трехфазной цепи при соединении фаз приемника звездой. Четырехпроводная система. Напряжение смещения нейтрали.

Нейтральный провод в трехфазной цепи при осветительной и электромашинной нагрузке, его значение. Расчет трехфазной цепи при соединении звездой с нейтральным проводом, сопротивлением которого можно пренебречь. Расчет трехфазной цепи при соединении звездой с нейтральным проводом, обладающим сопротивлением. Применение метода узлового напряжения для определения напряжения смещения нейтрали. Топографическая диаграмма.

Несимметричная нагрузка в трехфазной цепи при соединении треугольником. Обрыв фазы. Обрыв линейного провода. Топографическая диаграмма для этих режимов работы.

Выполнение индивидуальных заданий по теме: Расчет электрических цепей трехфазного переменного тока

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется трехфазной системой переменного тока?
2. Начертите схему соединения обмоток генератора звездой.
3. Какие существуют соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении в звезду?
4. Начертите схему соединения обмоток генератора треугольником.
5. В чем заключается роль нулевого провода?
6. Как определяются линейные токи при равномерной и неравномерной нагрузках соединенных треугольником?
7. Напишите формулы для определения активной, реактивной и полной мощностей трехфазного тока

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Методические указания к решению задачи 1

Эти задачи относятся к теме «Расчет электрических цепей постоянного тока». Решение их требует знания закона Ома, формул мощности, законов Кирхгофа, свойств последовательного и параллельного, соединения резисторов.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ

В электрической цепи за положительное направление эдс E принимается направление, совпадающее с силой, действующей на положительный заряд, т.е. от «-» источника к «+» источника питания.

За положительное направление напряжения U принято направление, совпадающее с направлением действия электрического поля, т.е. от «+» к «-» источника.

За положительное направление тока I принято направление, совпадающее с перемещением положительных зарядов, т.е. от «+» к «-» источника.

Электродвижущая сила источника в электрической цепи может иметь одинаковое и противоположное направление с током. В первом случае источник эдс работает в режиме генератора, т.е. является источником электрической энергии. При этом эдс оказывается больше напряжения на его зажимах ($E > U$). При направлении эдс в цепи противоположно току источник становится потребителем электрической энергии, и эдс оказывается меньше напряжения U на зажимах источника ($E < U$) на величину внутреннего падения напряжения IR_0 , где R_0 – внутреннее сопротивление источника.

При расчетах электрических цепей реальные источники электрической энергии заменяются схемами замещения. Схема замещения источника эдс содержит эдс и внутреннее сопротивление R_0 источника, которое много меньше сопротивления R_n потребителя электроэнергии ($R_0 \ll R_n$). При расчетах часто приходится внутреннее сопротивление источника эдс приравнять нулю.

В идеализированном источнике эдс падение напряжения на внутреннем сопротивлении $IR_0 = 0$, при этом напряжение на зажимах источника $U = const$ не зависит от тока I и равно эдс источника ($U = E$). В этом случае источник электроэнергии работает в режиме, близком к режиму холостого хода.

В источниках тока внутреннее сопротивление во много раз превосходит сопротивление потребителя электроэнергии ($R_0 \gg R_n$), при этом в источнике тока ток является величиной практически постоянной, не зависящей от нагрузки ($j = const$).

Реальный источник электрической энергии можно представить в схеме замещения последовательным соединением идеального источника эдс и внутреннего сопротивления R_0 .

Для участка цепи, не содержащего источник энергии (например, для схемы пассивного участка на рис. 1), связь между током I и напряжением U_{12} определяется законом Ома для участка цепи

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Sigma R} = \frac{U_{12}}{\Sigma R}$$

где φ_1 и φ_2 – потенциалы точек 1 и 2 цепи соответственно; $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ – напряжение (разность потенциалов) между точками 1 и 2 цепи; ΣR – арифметическая сумма сопротивлений на участке цепи; R_1 и R_2 – сопротивления участков цепи.

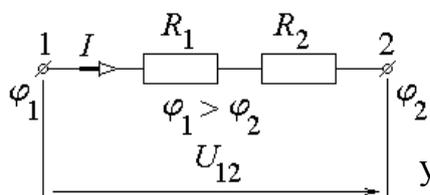


Рисунок 1 - Электрическая схема пассивного участка

Для участка цепи, содержащего источники эдс (рис. 2), т.е. для активного участка цепи, связь между током I , напряжением U_{12} и эдс источников определяется обобщенным законом Ома

$$I = \frac{U_{12} + \Sigma E}{\Sigma R}$$

где ΣE – алгебраическая сумма всех эдс участка цепи, причем со знаком «+» в нее входят эдс, совпадающие с направлением тока и со знаком «-» в нее входят эдс, не совпадающие с направлением тока.

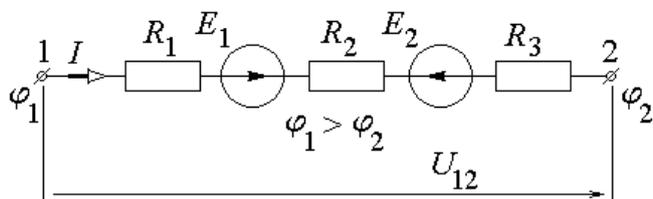


Рисунок 2 - Электрическая схема участка цепи, содержащего источники эдс/

На основании закона сохранения энергии мощность, развиваемая источниками электрической энергии, должна быть равна мощности преобразования в цепи электрической энергии в другие виды энергии

$$\Sigma EI = \Sigma(I^2 \cdot R),$$

где ΣEI – сумма мощностей, развиваемых источниками;

$\Sigma(I^2 \cdot R)$ – сумма мощностей всех приемников и необратимых преобразований энергии внутри источников (потери мощности на внутренних сопротивлениях).

Приведенное равенство называется **балансом мощностей** электрической цепи.

Если положительное направление тока совпадает с направлением эдс и в результате расчета получено положительное значение тока, то источник вырабатывает (генерирует) электрическую энергию, т.е. работает в режиме генератора. Если же получено отрицательное значение тока, то произведение EI отрицательно, т.е.

источник работает в режиме потребителя и является приемником электрической энергии (например, электродвигатель, аккумулятор в режиме зарядки).

В любой электрической цепи в соответствии с первым законом Кирхгофа алгебраическая сумма токов, направленных к узлу разветвления, равна нулю:

$$\sum I_k = 0$$

где I_k – ток в k -й ветви.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа алгебраическая сумма эдс $\sum E_j$ в любом замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме напряжений $\sum U_i$ и алгебраической сумме падений напряжений в этом контуре $\sum(I_k \cdot R_k)$

$$\sum E_j = \sum U_i + \sum(I_k \cdot R_k),$$

где R_k – сопротивление участка цепи рассматриваемого контура;

I_k – ток в сопротивлении R_k .

При расчете электрических цепей любым методом выбирают условно положительные направления токов, эдс и напряжений на участках цепи, которые обозначают стрелками на схеме, затем выбирают замкнутые контуры и задаются положительным направлением обхода контуров. При этом для удобства расчетов направление обхода для всех контуров рекомендуется выбирать одинаковым (например, по часовой стрелке).

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа эдс источников принимаются положительными, если направления их действия совпадают с выбранным направлением обхода контура, независимо от направления тока в них. При несовпадении их записывают со знаком «-». Падения напряжения в ветвях, в которых положительное направление тока совпадает с направлением обхода, независимо от направления эдс в этих ветвях – со знаком «+», в противном случае – со знаком «-».

В результате решения полученной системы из N уравнений находят действительные направления определяемых величин тока с учетом их знака. При этом величины, имеющие отрицательный знак, в действительности имеют противоположное направление условно принятому. Направления величин, имеющих

положительный знак, совпадают с условно принятым направлением.

Задача 1 предусматривает расчет сложной электрической цепи. Сложные цепи имеют несколько замкнутых контуров, электрически связанных друг с другом. В ветвях контуров, где находятся источники Э.Д.С. и резисторы, протекают разные по величине токи.

Существует несколько методов расчета сложных электрических цепей

Рассмотрим на примерах применение ряда методов.

Задача

Определить токи во всех ветвях цепи (рисунок 3), если Э.Д.С. источников энергии $E_1 = 150\text{В}$, $E_2 = 80\text{В}$, их внутренние сопротивления $R_{01} = 1\text{ Ом}$, $R_{02} = 0.5\text{ Ом}$; сопротивления резисторов $R_1 = 9\text{ Ом}$, $R_2 = 19.5\text{ Ом}$, $R_3 = 25\text{ Ом}$. Задачу решить методом узловых и контурных уравнений, составленных по законам Кирхгофа.

Составить уравнение баланса мощностей.

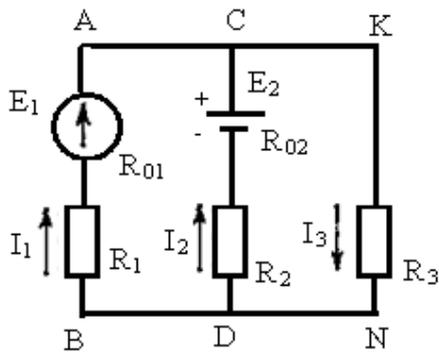


Рисунок 3 - Электрическая схема

Пример 1 Метод узловых и контурных уравнений, составленных по законам Кирхгофа

Решение

1. На схеме произвольно показываем направления токов ветвей.
2. В задаче три неизвестных тока, для их нахождения необходимо составить систему из трех уравнений.

Первое уравнение составим для узловой точки С по первому закону Кирхгофа:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

второе уравнение составим для контура ACDBA по второму закону Кирхгофа; направление обхода контура примем «по часовой стрелке»

$$E_1 - E_2 = I_1 (R_1 + R_{01}) - I_2 (R_2 + R_{02});$$

третье уравнение составим для контура CKNDС по второму закону Кирхгофа; направление обхода контура примем «по часовой стрелке»:

$$E_2 = I_2 (R_2 + R_{02}) + I_3 R_3.$$

3. Подставляем исходные данные в полученную систему из трех уравнений и находим значения токов ветвей:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1) \quad I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1)$$

$$E_1 - E_2 = I_1 (R_1 + R_{01}) - I_2 (R_2 + R_{02}) \quad (2) \quad 150 - 80 = I_1 (9 + 1) - I_2 (19.5 + 0.5) \quad (2)$$

$$E_2 = I_2 (R_2 + R_{02}) + I_3 R_3 \quad (3) \quad 80 = I_2 (19.5 + 0.5) + I_3 25 \quad (3)$$

Из второго уравнения получаем:

$$70 = 10 I_1 - 20 I_2; \quad I_1 = \frac{70 + 20 \cdot I_2}{10} = 7 + 2 I_2$$

Из третьего уравнения получаем:

$$80 = 20 I_2 + 25 I_3; \quad I_3 = \frac{80 - 20 \cdot I_2}{25} = 3.2 - 0.8 I_2$$

Подставляем выражения I_1 и I_3 в первое уравнение и находим ток I_2 :

$$I_2 + 7 + 2 I_2 - 3.2 + 0.8 I_2 = 0; \quad 3.8 I_2 = -3.8; \quad I_2 = -1 \text{ A}$$

Определяем токи I_1 и I_3 :

$$I_1 = 7 + 2 \cdot (-1) = 5 \text{ A}; \quad I_3 = 3.2 - 0.8 \cdot (-1) = 4 \text{ A}.$$

Проверка по первому закону Кирхгофа: $I_1 + I_2 - I_3 = 0; 5 - 1 - 4 = 0$.

Ток I_2 получился отрицательным, это значит, что первоначально произвольно принятое направление тока I_2 от точки Дк точке С оказалось неверным и должно быть изменено на противоположное. При этом ток I_2 будет направлен против направления Э.Д.С. E_2 , следовательно, источник с Э.Д.С. E_2 находится в режиме потребителя (например, заряд батареи аккумуляторов)

Пример 2 Метод контурных токов

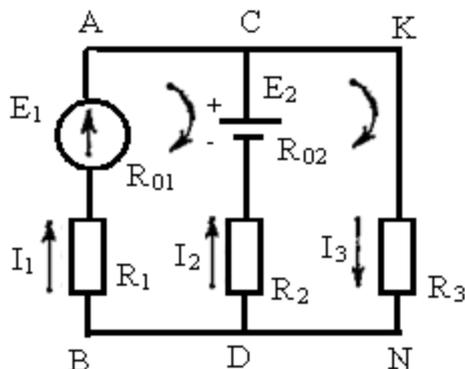


Рисунок 4 - Электрическая схема

Решение

1. На схеме произвольно показываем направление токов ветвей.
2. Намечаем два независимых контура и указываем направление контурных токов « по часовой стрелке»
3. Определяем Э.Д.С. каждого контура:

$$E_I = E_1 - E_2 = 150 - 80 = 70 \text{ В}$$

$$E_{II} = E_2 = 80 \text{ В}$$

4. Определяем собственные и общие сопротивления контуров:

- собственные сопротивления

$$R_{I1} = R_1 + R_{01} + R_{02} + R_2 = 9 + 1 + 0,5 + 19,5 = 30 \text{ Ом}$$

$$R_{II2} = R_2 + R_{02} + R_3 = 19,5 + 0,5 + 25 = 45 \text{ Ом}$$

- общие сопротивления

$$R_{I2} = R_{21} = R_2 + R_{02} = 19,5 + 0,5 = 20 \text{ Ом}$$

5. Составляем уравнения:

$$I_I R_{I1} - I_{II} R_{I2} = E_I$$

$$- I_I R_{21} + I_{II} R_{II2} = E_{II}$$

6. Подставляем данные, полученные в пунктах 3, 4 и решаем систему уравнений методом подстановки или любым другим методом.

$$I_I 30 - I_{II} 20 = 70 \quad (1) \quad (* 2)$$

$$- I_I 20 + I_{II} 45 = 80 \quad (2) \quad (* 3)$$

$$60 I_I - 40 I_{II} = 140 \quad (3)$$

$$- 60 I_I + 135 I_{II} = 240 \quad (4)$$

$$95 I_{II} = 380$$

$$I_{II} = 4 \text{ A}$$

7. Подставляем значение I_{II} в формулу (1) и определяем ток I_I .

$$30 I_I - 4 \cdot 20 = 70$$

$$I_I = 150 / 30$$

$$I_I = 5 \text{ A}$$

8. Определяем действительные токи в ветвях, исходя из условия, что действительный ток, совпадающий по направлению с контурным током берется со знаком «+», и наоборот, ток в ветви не совпадающий с контурным током берется со знаком «-».

$$I_1 = I_I = 5 \text{ A}$$

$$I_2 = I_{II} - I_I = 4 - 5 = -1 \text{ A}$$

$$I_3 = I_{II} = 4 \text{ A}$$

Пример 3 Метод узлового напряжения

Решение

1. Проводимости ветвей

$$g_1 = \frac{1}{R_1 + R_{01}} = \frac{1}{9 + 1} = 0.1 \text{ См}$$

$$g_2 = \frac{1}{R_2 + R_{02}} = \frac{1}{19.5 + 0.5} = 0.05 \text{ См}$$

$$g_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{25} = 0.04 \text{ См}$$

2. Узловое напряжение

$$U_{CD} = \frac{\sum_1^n E_i \cdot g_i}{\sum_1^n g_i} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_3} = \frac{150 \cdot 0.1 + 80 \cdot 0.05}{0.1 + 0.05 + 0.04} = 100 \text{ В}$$

3. Токи в ветвях

$$I_1 = (E_1 - U_{CD}) \cdot g_1 = (150 - 100) \cdot 0.1 = 5 \text{ A}$$

Направление тока I_1 совпадает с направлением Э.Д.С. E_1 . Ток I_1 направлен от узла С к узлу D.

$$I_2 = (E_2 - U_{CD}) \cdot g_2 = (80 - 100) \cdot 0.05 = -1 \text{ A}$$

Направление тока I_2 противоположно направлению Э.Д.С. E_2 (режим потребителя). Ток I_2 направлен от узла С к узлу D.

$$I_3 = (0 - U_{CD}) \cdot g_3 = (0 - 100) \cdot 0.04 = -4 \text{ A}$$

Ток I_3 направлен от узла С к узлу D. Покажем направление токов на заданной схеме (рисунок 5)

4. Составим уравнение баланса мощностей цепи.

$$\sum P_{ист} = \sum P_{номп}$$

Для данной цепи $E_1 I_1 - E_2 I_2 = I_1^2 (R_1 + R_{01}) + I_2^2 (R_2 + R_{02}) + I_3^2 R_3$

$$150 \cdot 5 - 80 \cdot 1 = 5^2 (9 + 1) + 1^2 (19.5 + 0.5) + 4^2 \cdot 25$$

$$670 \text{ Вт} = 670 \text{ Вт}$$

Методические указания к решению задачи 2

Эти задачи относятся к теме "Однофазные электрические цепи переменного синусоидального тока". В этих цепях, так же как и в цепях постоянного тока, при решении задач использует закон Ома, первый закон Кирхгофа, формулы мощности, свойства последовательного и параллельного соединений. Однако из-за того, что в переменном токе действует три вида совершенно различных по характеру сопротивлений (активное R , индуктивное X_L и емкостное X_C) форма записи законов изменяется. Иначе устанавливается связь и между однородными электрическими величинами. Так, при последовательном соединении в постоянном токе общее сопротивление было равно арифметической сумме сопротивлений, в переменном токе берется уже геометрическая сумма R , X_L , X_C . Геометрически складываются также напряжения и мощности на этих сопротивлениях.

На основании закона Ома напряжения на активном, индуктивном и емкостном сопротивлениях могут быть определены по формулам: $U_R = I \cdot R$; $U_L = I \cdot X_L$;
 $U_C = I \cdot X_C$

При этом следует иметь в виду, что U_R — совпадает по фазе с током, U_L — опережает по фазе ток на 90° , U_C — отстает от тока на 90° .

Результирующее напряжение U представляет геометрическую сумму напряжений U_R , U_L и U_C . На рисунке 11 представлена векторная диаграмма этих напряжений.

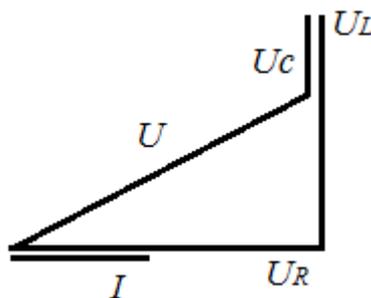


Рисунок 11 - Векторная диаграмма

Результирующее напряжение U , которое является напряжением, подведенным к зажимам цепи, (можно найти не только графически в этом случае диаграмма должна быть построена в масштабе), но и математически, на основании теоремы Пифагора:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

Если каждое из напряжений на векторной диаграмме (рис.11) разделить на ток I , то получится фигура, подобная векторной диаграмме, которая будет называться треугольником сопротивлений (рис 12) т.к.

$$R = \frac{U_R}{I}; \quad X_L = \frac{U_L}{I}; \quad X_C = \frac{U_C}{I}$$

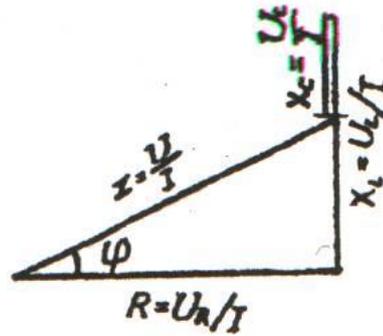


Рисунок 12 - Диаграмма сопротивлений

Из треугольника сопротивлений следует, что

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

Если каждое из напряжений на векторной диаграмме (рис. 11) умножить на ток I , то получится фигура, подобная векторной диаграмме, которая будет называться треугольником мощностей (рис 13), т. к. $P = U_R \cdot I$; $Q_L = U_L \cdot I$; $Q_C = U_C \cdot I$

Из треугольника мощностей следует, что $S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}$

Используя закон Ома для каждого элемента цепи ток можно найти по формулам:

$$P = I^2 \cdot R; \quad Q_L = I^2 \cdot X_L; \quad Q_C = I^2 \cdot X_C;$$

$$P = \frac{U_R^2}{R}; \quad Q_L = \frac{U_L^2}{X_L}; \quad Q_C = \frac{U_C^2}{X_C}; \quad S = I^2 \cdot Z \quad \text{или} \quad S = \frac{U^2}{Z}$$

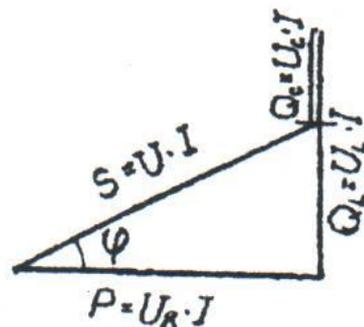


Рисунок 13 - Диаграмма мощностей

Из треугольника мощностей (рис 13) так же следует, что

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad \text{или} \quad P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad \text{или} \quad Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi,$$

где $Q = Q_L - Q_C$ - результирующая реактивная мощность

Анализируя векторную диаграмму напряжений (рис. 11), треугольник сопротивлений (рисунок 4), треугольник мощностей (рис. 13), можно сделать вывод что при $U_L > U_C$ ($X_L > X_C$) результирующий вектор напряжения U опережает вектор тока

I на угол $\varphi < 90^\circ$, а при $U_L < U_C$ ($X_L < X_C$) результирующий вектор напряжения отстает от вектора тока на угол φ . $\cos\varphi = P/S$ - называется коэффициентом мощности

Особенности расчета цепи при другой комбинации элементов схемы. При отсутствии одного из реактивных сопротивлений все электрические параметры определяются по вышеприведенным формулам. При этом из них нужно исключить параметры с индексом отсутствующего элемента.

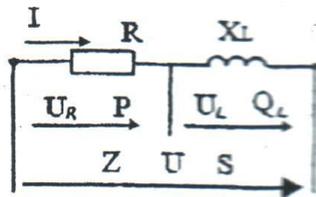


Рисунок 14 - Электрическая схема

На рисунке 6 изображена цепь с последовательным соединением R и X_L , элемент X_C отсутствует, поэтому $U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$; $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$; $S = \sqrt{P^2 + Q_L^2}$; $Q = Q_L$;
 $\sin \varphi = \frac{U_L}{U}$; $\sin \varphi = \frac{X_L}{Z}$; $\sin \varphi = \frac{Q_L}{S}$

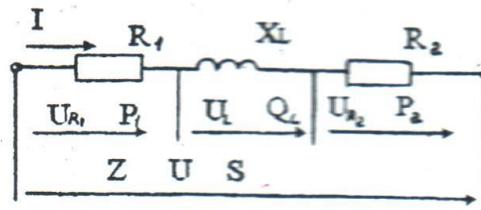


Рисунок 15 - Электрическая схема

$$U = \sqrt{(U_{R1} + U_{R2})^2 + U_L^2}; \quad Z = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + X_L^2}; \quad S = \sqrt{(P_1 + P_2)^2 + Q_L^2};$$

$$\cos \varphi = \frac{U_{R1} + U_{R2}}{U}; \quad \cos \varphi = \frac{R_1 + R_2}{Z}; \quad \cos \varphi = \frac{P_1 + P_2}{S}$$

Векторная диаграмма, треугольник сопротивлений и треугольник мощностей будут иметь вид, изображенный на рисунке 16

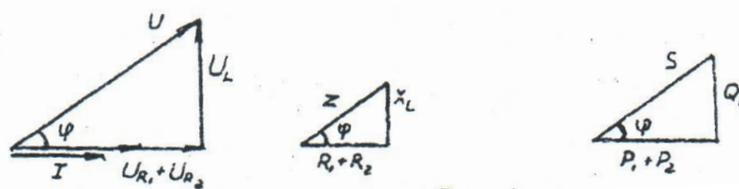


Рисунок 16 - Векторная диаграмма

Цепь с последовательным соединением электроприемников, содержащая активное, индуктивное и емкостное сопротивления

Пример 2

На рисунке 17 в однофазную электрическую цепь переменного синусоидального тока напряжением $U=50В$ включены активные $R_1=9Ом$ и $R_2=11Ом$ и реактивные элементы, обладающие сопротивлениями $X_L = 12Ом$, $X_C=27Ом$.

Определить: ток I в цепи; напряжение на каждом элементе цепи; активные, реактивные и полное сопротивления; угол сдвига фаз между напряжением и током (по величине и знаку); активные и реактивные мощности элементов; активную, реактивную и полную мощности цепи.

Построить в масштабе векторную диаграмму напряжений. После построения диаграммы измерить вектор суммарного напряжения и убедиться в том, что с учетом масштаба его величина равна напряжению, подведенному к зажимам цепи

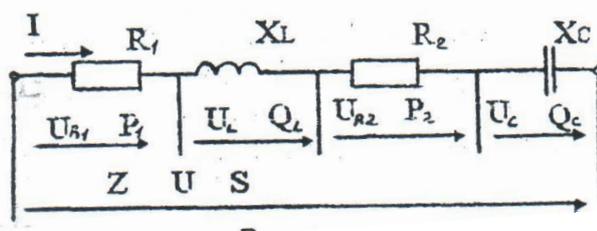


Рисунок 17 - Электрическая схема

Решение

1. Определяем полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2) + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(9 + 11)^2 + (12 - 27)^2} = 25 Ом$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{50}{25} = 2$$

2. Определяем ток цепи

3. Определяем падение напряжения:

на активном сопротивлении R_1 $U_{R1} = I \cdot R_1 = 2 \cdot 9 = 18В$

на активном сопротивлении R_2 $U_{R2} = I \cdot R_2 = 2 \cdot 11 = 22В$

на индуктивном сопротивлении $U_L = I \cdot X_L = 2 \cdot 12 = 24В$

на емкостном сопротивлении $U_C = I \cdot X_C = 2 \cdot 27 = 54В$

4. Определяем угол сдвига фаз между напряжением и током

$$\cos \varphi = \frac{R_1 + R_2}{Z} = \frac{9 + 11}{25} = 0,8; \quad \sin \varphi = \frac{X_L - X_C}{Z} = \frac{12 - 27}{25} = -0,6 \quad \varphi = -36,9^\circ$$

5. Определяем активную мощность цепи

$$P = P_1 + P_2 = I^2 \cdot (R_1 + R_2) = 2^2 \cdot (9 + 11) = 80 Вт$$

6. Определяем реактивную мощность цепи $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 50 \cdot 2 \cdot (-0,6) = -60 ВАр$

7. Определяем полную мощность цепи $S = I \cdot U = 2 \cdot 50 = 100 ВА$

8. Построение векторной диаграммы начинаем с выбора масштаба для тока и напряжения. Задаем масштаб по току и по напряжению $m_I = 1А/см$;

$$m_U = 10В/см$$

Здесь m_I и m_U - масштабные коэффициенты. Они показывают, сколько ампер или вольт содержится в 1 см. Масштаб можно задавать и графически (см. рис. 18).

Порядок построения

От точки 0 горизонтально вправо проводим вектор тока I общий для всей цепи. В выбранном масштабе его длина будет

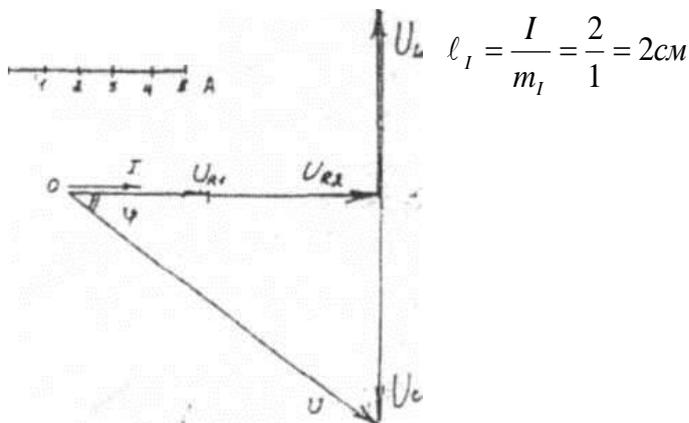


Рисунок 18 - Векторная диаграмма

Вектор активного напряжения совпадает по фазе с током, угол сдвига фаз между ними равен 0 , поэтому откладываем его вдоль вектора тока от точки 0 вправо. В выбранном масштабе его длина будет

$$l_{U_{R1}} = \frac{U_{R1}}{m_U} = \frac{18}{10} = 1,8 \text{ см}$$

От конца вектора U_{R1} , откладываем вправо вдоль вектора тока вектор активного напряжения U_{R2} . Его длина будет

$$l_{U_{R2}} = \frac{U_{R2}}{m_U} = \frac{22}{10} = 2,2 \text{ см}$$

От конца вектора U_{R2} откладываем вертикально вверх вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении U_L так как он опережает ток на угол 90° . Его длина будет

$$l_{U_L} = \frac{U_L}{m_U} = \frac{24}{10} = 2,4 \text{ см}$$

От конца вектора U_L откладываем вертикально вниз вектор падения напряжения U_C на емкостном сопротивлении, т.к. он отстает от тока угол 90° . Его длина будет

$$l_{U_C} = \frac{U_C}{m_U} = \frac{54}{10} = 5,4 \text{ см}$$

Геометрическая сумма векторов U_{R1} , U_{R2} , U_L и U_C должна быть равна полному напряжению U , приложенному к зажимам цепи, т.е. $\vec{U} = \vec{U}_{R1} + \vec{U}_{R2} + \vec{U}_L + \vec{U}_C$

Измерив длину этого вектора, убеждаемся, что она $l_U = 5$ см. Это значит, что с учетом масштаба его величина будет: $U = l_U \cdot m_U = 5 \cdot 10 = 50 \text{ В}$

По условию задачи именно такое напряжение приложено к зажимам цепи.

Примечание:

Если в выбранном масштабе вектор суммарного напряжения не будет равен приложенному к зажимам цепи напряжению, то это будет говорить об ошибке, допущенной в решении задачи или в построении векторной диаграммы. Ее нужно найти и устранить:

Чаще всего наблюдаются ошибки, связанные с искажением масштабов при построении векторной диаграммы. Учтите это, при построении векторной диаграммы пользуйтесь чертежным инструментом. Выполняйте диаграмму точно и аккуратно.

Методические указания к решению задачи 3

Эти задачи относятся к трехфазным электрическим цепям переменного синусоидального тока

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ

В трехфазных цепях потребители соединяют по схеме «звезда» или «треугольник».

При соединении приемников энергии «звездой» линейные напряжения обозначаются U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , а в общем виде – U_L ; фазные напряжения обозначаются U_A , U_B , U_C , а в общем виде – U_ϕ

Токи обозначаются - I_A , I_B , I_C , причем ток линейный равен току фазному, поэтому в общем виде $I_L = I_\phi$

При наличии нулевого провода при любой нагрузке, а при равномерной нагрузке и без нулевого провода $U_L = \sqrt{3}U_\phi$ (линейное напряжение больше фазного в $\sqrt{3}$ раз). При равномерной нагрузке фаз активная мощность всей цепи $P = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi_\phi$ или $P = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi_\phi$ При неравномерной нагрузке мощность всей цепи $P = P_{\phi 1} + P_{\phi 2} + P_{\phi 3}$, где $P_\phi = U_\phi I_\phi \cos\varphi_\phi$.

При соединении потребителей треугольником фазное напряжение равно линейному: $U_\phi = U_L$, обозначаются напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}

Фазные токи обозначаются I_A , I_B , I_C , в общем виде - I_ϕ . Линейные токи обозначаются I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} , в общем виде - I_L . При равномерной нагрузке фаз $I_L = \sqrt{3}I_\phi$.

При неравномерной нагрузке фаз линейные токи определяются на основании первого закона Кирхгофа из векторной диаграммы, как геометрическая разность фазных токов.

При соединении приемников энергии «звездой» сеть может быть четырехпроводной - при наличии нулевого провода, или трехпроводной - без нулевого провода

При соединении приемников энергии «треугольником» сеть может быть только трехпроводной.

Четырехпроводная трехфазная цепь позволяет присоединить:

- а) трехфазные приемники к трем линейным проводам;
- б) однофазные приемники между каждым линейным проводом и нейтральным.

Пример 5

На рисунке 9 показана трехфазная сеть, питающая две нагрузки, одна из которых соединена звездой, другая - треугольником. Система линейных напряжений симметрична $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L = 380 \text{ В}$.

Приемник энергии, соединенный звездой, имеет мощности фаз $P_A = 2200 \text{ Вт}$; $P_B = 4840 \text{ Вт}$; $P_C = 7700 \text{ Вт}$; коэффициент мощности $\cos \varphi^Y = 1 (\varphi^Y = 0^\circ)$.

Приемник энергии, соединенный треугольником, - симметричный, мощности фаз $P_{AB} = P_{BC} = P_{CA} = 4260 \text{ Вт}$; $\cos \varphi^\Delta = 0,866 (\varphi^\Delta = 30^\circ)$; характер нагрузки - активно - индуктивный.

Определить фазные и линейные токи нагрузок, токи в проводах линии, питающей обе нагрузки, и ток в нейтральном проводе.

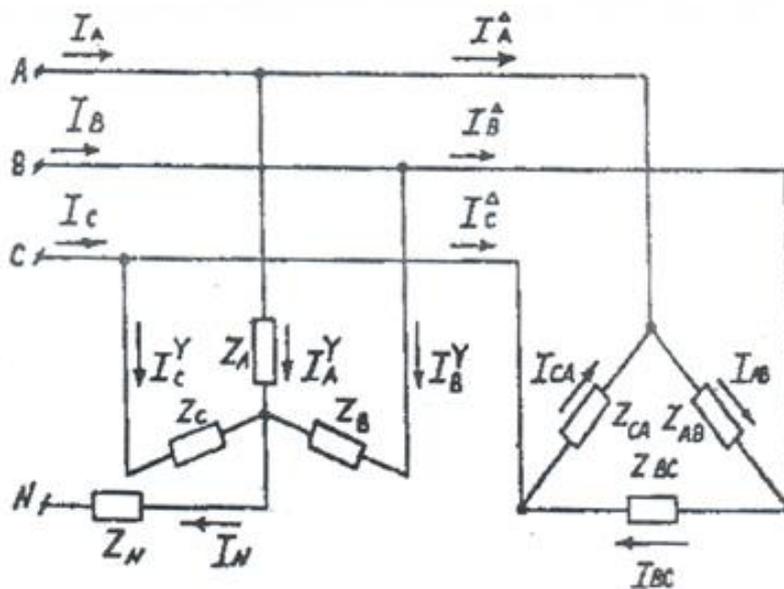


Рисунок 9 -Трехфазная цепь

Решение

Фазные напряжения нагрузки, соединенной звездой, благодаря нейтральному проводу равны:

$$U_A = U_B = U_C = U / \sqrt{3} = 380 / 1.73 = 220 \text{ В}$$

Фазные (линейные) токи нагрузки, соединенные звездой,

$$I_A^Y = \frac{P_A}{U_A \cos \varphi_A} = \frac{2200}{220 \cdot 1} = 10 \text{ А}$$

$$I_B^Y = \frac{P_B}{U_B \cos \varphi_B} = \frac{4840}{220 \cdot 1} = 22 \text{ А}$$

$$I_C^Y = \frac{P_C}{U_C \cos \varphi_C} = \frac{7700}{220 \cdot 1} = 35 \text{ А}$$

Согласно первому закону Кирхгофа для нейтральной точки N имеем:

$$\vec{I}_N = \vec{I}_A^Y + \vec{I}_B^Y + \vec{I}_C^Y$$

Следовательно, построив симметричную трехлучевую звезду фазных напряжений и отложив вдоль этих напряжений соответствующие фазные точки (так как $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi^Y = 0^\circ$, поскольку $\cos \varphi^Y = 1$), можно, геометрически сложив эти токи, определить вектор тока \vec{I}_N в нейтральном проводе (см. рисунок 10).

Зададимся масштабами $m_u = 55 \text{ В/см}$ и $m_i = 10 \text{ А/см}$

Производим указанное построение и графическим путем определяем

$$I_N = I_{I_N} \cdot m_i = 2 \cdot 10 = 20 \text{ А}$$

Согласно условию задачи трехфазный приемник, соединенный треугольником, - активно-индуктивный и, следовательно, фазные токи \vec{I}_A ; \vec{I}_B ; \vec{I}_C отстают по фазе относительно вызывающих их напряжений \vec{U}_{AB} ; \vec{U}_{BC} ; \vec{U}_{CA} соответственно на угол $\varphi^\Delta = \arccos 0,866 = 30^\circ$. По величине эти фазные токи равны

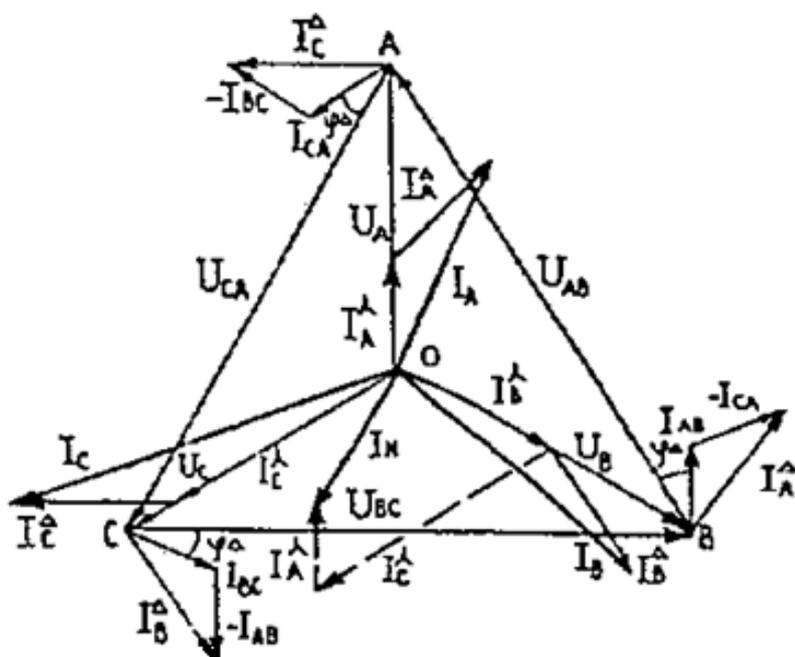


Рисунок 10- Векторная диаграмма

$$I_\phi^\Delta = I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = \frac{P_\phi^\Delta}{U_\phi^\Delta \cos \varphi^\Delta} = \frac{4260}{380 \cdot 0,866} = 13 \text{ А}$$

причем $U_l^\Delta = U_\phi^\Delta = 380 \text{ В}$.

Соблюдая условия сдвига, длины векторов и выбранный масштаб токов m_i , производим построение векторов фазных токов \vec{I}_{AB} ; \vec{I}_{BC} ; \vec{I}_{CA}

На основании первого закона Кирхгофа, примененного в узловых точках-вершинах треугольника, имеем:

$$\vec{I}_A^\Delta = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}; \quad \vec{I}_B^\Delta = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}; \quad \vec{I}_C^\Delta = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}$$

На основании этих равенств строим векторы линейных токов нагрузки, соединенной треугольником.

При симметричной нагрузке в фазах треугольника линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз и отстает на 30° по фазе от первого из двух составляющих фазных токов

$$I_A^\Delta = I_B^\Delta = I_C^\Delta = \sqrt{3} \cdot I_\Phi^\Delta = \sqrt{3} \cdot 13 = 22,5 \text{ А}$$

Проверка с помощью векторной диаграммы, например,

$$I_A^\Delta = l_{I_A^\Delta} \cdot m_i = 2,25 \cdot 10 = 22,5 \text{ А и т.д.}$$

Суммарные токи в проводах линии, питающей обе нагрузки, определяют графическим путем на основании первого закона Кирхгофа

$$\vec{I}_A = \vec{I}_A^Y + \vec{I}_A^\Delta; \quad I_A = l_{I_A} \cdot m_i$$

$$\vec{I}_B = \vec{I}_B^Y + \vec{I}_B^\Delta; \quad I_B = l_{I_B} \cdot m_i$$

$$\vec{I}_C = \vec{I}_C^Y + \vec{I}_C^\Delta; \quad I_C = l_{I_C} \cdot m_i$$

где l —длина вектора тока, получена из векторной диаграммы непосредственным измерением. Отсюда видно, что ток в нейтральном проводе непосредственно не фигурирует в выражениях суммарных линейных токов

Методические указания к заданию 4

Эти задачи относятся к теме «Электрические цепи с несинусоидальными периодическими токами и напряжениями». Для их решения необходимо свойства периодических кривых.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ

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 неразветвленной цепи, состоящей из R, L и C (рис. 11), 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 11 - Неразветвленная цепь, состоящая из R, L и C

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 частота ω , и для любой гармоники может быть определено выражением

$$X_{Lk} = k\omega L = kX_{L1}$$

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} — емкостное сопротивление первой гармоники.

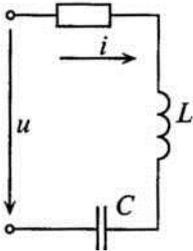
Полное сопротивление неразветвленной линейной цепи для любой гармоники

$$Z_k = \sqrt{R^2 + (X_{Lk} - X_{Ck})^2}$$

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 определенной 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 и 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 неразветвленной 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

$$i_k = I_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k)$$

то напряжение в цепи, соответствующее этой гармонике, равно

$$u_k = U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_1 + \varphi_k)$$

Действующее значение несинусоидальной величины

Действующим называют значение несинусоидального тока, эквивалентное по-

стоянному току по тепловому действию.

При этом нужно учесть, что несинусоидальный ток складывается из постоянной составляющей и ряда гармоник:

$$\begin{aligned} i &= I_0 + i_1 + i_2 + i_3 + \dots \\ &= I_0 + I_{m1} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{m2} \sin(3\omega t + \psi_2) + I_{m3} \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots \end{aligned}$$

Каждая составляющая несинусоидального тока выделяет тепло в некотором элементе цепи с сопротивлением R . Для определения действующих значений тока гармоник и постоянной составляющей несинусоидального тока, можно сделать вывод, что

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2}$$

где I_0 — постоянная составляющая несинусоидального тока; I_1, I_2, I_k — действующее значение токов гармоник, т. е. $I_k = \frac{I_{mk}}{\sqrt{2}}$

Таким образом, *действующее значение несинусоидального тока является средней квадратичной величиной постоянной составляющей и действующих значений токов гармоник.*

Аналогично действующее значение несинусоидального напряжения определяется выражением

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2}$$

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, \dots, 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.

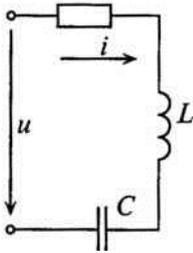
Постоянная составляющая реактивной мощности отсутствует, так как для постоянного тока колебание мощности (энергии) немыслимо.

Полная, или кажущаяся, мощность в цепях несинусоидального тока равна

$$S = UI$$

Следует иметь в виду, что несинусоидальный ток или напряжение не могут быть выражены при помощи векторов. Кривые несинусоидального тока и напряжения в общем случае даже не подобны. Так что невозможно применить понятие об угле сдвига фаз, принятое для синусоидальных токов.

Поэтому при изучении некоторых свойств цепей несинусоидального тока несинусоидальные токи и напряжения заменяют эквивалентными синусоидальными. Замена производится таким образом, что действующее значение синусоидального тока принимается равным действующему значению заменяемого несинусоидального тока, а действующее значение синусоидального напряжения принимается равным действующему значению несинусоидального напряжения.



Тогда угол сдвига фаз φ между эквивалентными синусоидами напряжения и тока выбирается таким, чтобы активная мощность эквивалентного синусоидального тока была равна активной мощности несинусоидального тока, т.е. $P_3 \approx U_3 I_3 \cos \varphi_3$

$$\text{Откуда } \cos \varphi_3 = \frac{P_3}{U_3 I_3}$$

При этом $S_3 = U_3 I_3$. Однако для цепи несинусоидального тока в общем случае

$$S \neq \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Пример 6

Определить действующие значения тока, напряжения, активную мощность цепи и коэффициент мощности. Написать уравнение мгновенного значения тока цепи, если $R = 50$ Ом, $X_L = 10$ Ом, $X_C = 90$ Ом соединены последовательно (рис. 12), а приложенное напряжение задано уравнением

$$u = 268 \sin \omega t + 70,5 \sin 3 \omega t + 42 \sin 5 \omega t, \text{ В}$$

Рисунок 12 – Расчетная схема

Решение

1. Определяем полное сопротивление цепи для гармоник.

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + (X_{L1} - X_{C1})^2} = \sqrt{50^2 + (10 - 90)^2} = 94 \text{ Ом}$$

$$Z_3 = \sqrt{R^2 + (X_{L3} - X_{C3})^2} = \sqrt{50^2 + (30 - 30)^2} = 50 \text{ Ом}$$

где $X_{L3} = 3 \cdot X_{L1} = 3 \cdot 10 = 30$ Ом; $X_{C3} = X_{C1} / 3 = 90 / 3 = 30$ Ом

$$Z_5 = \sqrt{R^2 + (X_{L5} - X_{C5})^2} = \sqrt{50^2 + (50 - 18)^2} = 59 \text{ Ом}$$

где $X_{L5}=5 \cdot X_{L1}=5 \cdot 10 = 50 \text{ Ом}$; $X_{C5} = X_{C1} / 5 = 90/5 = 18 \text{ Ом}$

2. Определяем максимальное значение тока гармоник.

$$\begin{aligned} I_{m1} &= U_{m1} / Z_1 = 268 / 94 = 2,84 \text{ А} \\ I_{m3} &= U_{m3} / Z_3 = 70,5 / 50 = 1,41 \text{ А} . \\ I_{m5} &= U_{m5} / Z_5 = 42 / 59 = 0,73 \text{ А} . \end{aligned}$$

3. Действующее значение токов гармоник.

$$I_1 = \frac{I_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{2,84}{1,41} = 2 \text{ А} \quad I_3 = \frac{I_{m3}}{\sqrt{2}} = \frac{1,41}{1,41} = 1 \text{ А} \quad I_5 = \frac{I_{m5}}{\sqrt{2}} = \frac{0,73}{1,41} = 0,52 \text{ А}$$

4. Сдвиг фаз между током и напряжением гармоник.

$$\begin{aligned} \text{tg } \varphi_1 &= (X_{L1} - X_{C1})/R = (10 - 90)/50 = -1,6; \quad \varphi_1 = -58^\circ \\ \text{tg } \varphi_3 &= (X_{L3} - X_{C3})/R = (30 - 30) / 50 = 0; \quad \varphi_3 = 0^\circ \\ \text{tg } \varphi_5 &= (X_{L5} - X_{C5})/R = (50 - 18) / 50 = 0,64; \quad \varphi_5 = 33^\circ \end{aligned}$$

5. Действующее значение несинусоидального тока цепи.

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2} = \sqrt{2^2 + 1^2 + 0,73^2} = 2,3 \text{ A}$$

6. Действующее значение несинусоидального напряжения цепи.

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2} = \sqrt{\frac{U_{m1}^2}{2} + \frac{U_{m3}^2}{2} + \frac{U_{m5}^2}{2}} = \sqrt{\frac{268^2}{2} + \frac{70,5^2}{2} + \frac{42^2}{2}} = 200 \text{ B}$$

7. Активная мощность цепи.

$$P = P_1 + P_3 + P_5 = (I_1^2 + I_3^2 + I_5^2) \cdot R = (2^2 + 1^2 + 0,73) \cdot 50 = 263 \text{ Bm}$$

8. Реактивная мощность цепи

$$Q = Q_1 + Q_3 + Q_5 = I_1^2 \cdot (X_{L1} - X_{C1}) + I_3^2 \cdot (X_{L3} - X_{C3}) + I_5^2 \cdot (X_{L5} - X_{C5}) = \\ = 2^2 \cdot (10 - 90) + 1^2 \cdot (30 - 30) + 0,73^2 \cdot (50 - 18) = 337,05 \text{ BAp}$$

9. Полная мощность цепи

$$S = U \cdot I = 200 \cdot 2,3 = 460 \text{ B} \cdot \text{A}$$

10 Коэффициент мощности цепи.

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{263}{200 \cdot 2,3} = 0,57$$

11 Уравнение мгновенного значения тока цепи.

$$i = I_{m1} \cdot \sin(\omega t - \varphi_1) + I_{m3} \cdot \sin(3\omega t - \varphi_3) + I_{m5} \cdot \sin(5\omega t - \varphi_5) = \\ = 2,84 \cdot \sin(\omega t + 58^\circ) + 1,41 \cdot \sin 3\omega t + 0,73 \cdot \sin(5\omega t - 33^\circ) \text{ A}$$

Методические указания к заданию 5

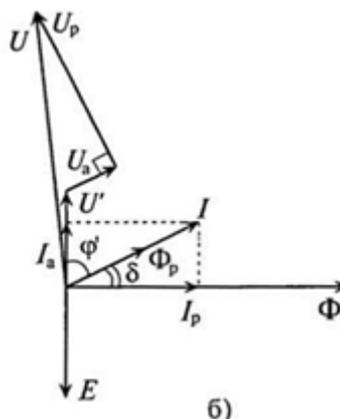
Задача 5 относится к теме «Нелинейные электрические цепи переменного тока». Наиболее распространенным нелинейным элементом переменного тока в электрических машинах, трансформаторах и других аппаратах является катушка со стальным сердечником. Задача 5 предусматривает расчет катушки со стальным сердечником.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ

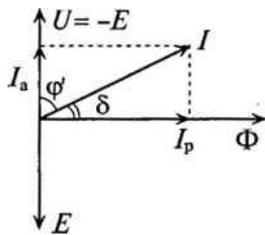
Мощность потерь. Векторная диаграмма катушки со стальным сердечником

При расчете цепи катушки со стальным сердечником несинусоидальный намагничивающий ток i часто заменяют эквивалентным синусоидальным, который имеет то же действующее значение, что и несинусоидальный. При этой замене пользуются поправочным коэффициентом зависящим от формы кривой тока, которая в свою очередь зависит от максимального значения индукции в сердечнике B_m .

Если учесть потери на циклирование в сердечнике $P_{\text{цн}}$ и на вихре-
тери в стали $-P_{\text{ст}} = P_{\text{цн}} + P_{\text{вт}}$, то ток
ным сердечником отстает от напря-
(рис. 13а).



ческое перемангни-
вые токи $P_{\text{вт}}$, т. е. по-
в катушке со сталь-
жения на угол $\varphi' < 90^\circ$



а)

Рисунок 13 – Векторные диаграммы катушки со стальным сердечником

При этом появляется активная составляющая тока

$$I_a = \frac{P_{ст}}{U} = I \cdot \cos \varphi' = I \cdot \sin \delta$$

совпадающая по фазе с напряжением, и реактивная составляющая тока

$$I_p = I \cdot \sin \varphi' = I \cdot \cos \delta$$

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. 13а), называется углом потерь

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_a}{I_p}$$

Если не пренебрегать активным сопротивлением катушки R , то падение напряжения на этом сопротивлении $U_a = I \cdot R$ совпадает по фазе с током I . На активном сопротивлении возникают потери мощности, которые являются электрическими потерями и называются потерями в меди $P_m = I^2 \cdot R$. 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 $I_a = I \cdot \cos \varphi$, так как $\cos \varphi = \frac{P}{UI}$.

Большая часть магнитного потока, т. е. основной поток Φ , замыкается в сердечнике, а незначительная часть потока Φ_p рассеивается. Поток рассеяния Φ_p индуцирует в катушке ЭДС рассеяния

$$E_p = I \omega L_p = I X_p$$

где L_p — индуктивность рассеяния.

На преодоление ЭДС рассеяния в напряжении, приложенном к катушке, появляется составляющая $U_p = -E_p$, 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 $U' = -E$, где E создается основным магнитным потоком Φ , падения напряжения на активном сопротивлении катушки $U_a = I \cdot R$ и напряжения $U_p = -E_p$, т.е. $\dot{U} = \dot{U}' + \dot{U}_a + \dot{U}_p$. Это выражение используется при построении векторной диаграммы катушки со стальным сердечником (рис. 13б).

Схема замещения

14. Эквивалентная схема катушки со стальным сердечником изображена на рис.

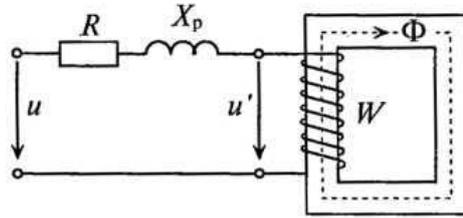


Рисунок 14 - Эквивалентная схема катушки со стальным сердечником

На эквивалентной схеме выделены активное сопротивление R и индуктивное сопротивление рассеяния X_p . Оставшуюся катушку с сердечником можно считать идеальной.

Напряжение $U' = -E$ для идеальной катушки можно представить суммой падений напряжений на активном сопротивлении $R_0 = \frac{P_{ст}}{I^2} = \frac{U'}{I} \cos\varphi'$ и индуктивном $X_0 = \frac{U}{I} \sin\varphi'$

Эти соображения легли в основу построения схемы замещения катушки со стальным сердечником (рис.

15)

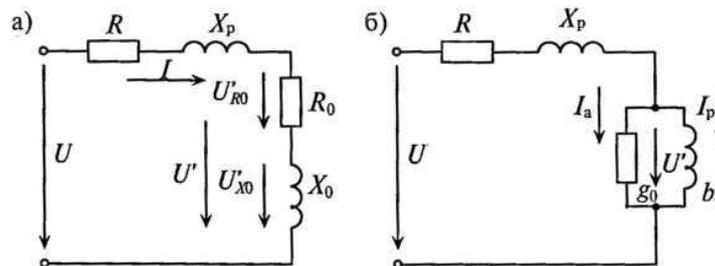


Рисунок 15 – Неразветвленная и разветвленная схемы замещения катушки со стальным сердечником

Реальная катушка и схема ее замещения при одинаковых напряжениях на зажимах U имеют одинаковые токи и мощности.

Активная составляющая тока определяет активную проводимость идеальной катушки

$$g_0 = \frac{I_a}{U'} = \frac{P_{ст}}{(U')^2} = \frac{R_0}{R_0^2 + X_0^2},$$

а намагничивающий ток — реактивную проводимость

$$b_0 = \frac{I_p}{U'} = \frac{X_0}{R_0^2 + X_0^2}$$

На рис. 15 б показана схема замещения катушки со стальным сердечником с учетом этих проводимостей.

Пример 7

Для катушки, намотанной на сердечник из электротехнической стали, определить все необходимые данные для построения векторной диаграммы и схем замещения катушки. Активное сопротивление катушки $R = 3$ Ом и магнитного рассеяния $X_p = 1,5$ Ом. Величина тока в катушке $I = 4$ А, подводимое переменное напряжение $U = 120$ В; активная мощность потерь в катушке $P = 100$ Вт,

Решение

1 Вычертим неразветвленную схему замещения данной катушки и определим параметры этой схемы (рис. 16)

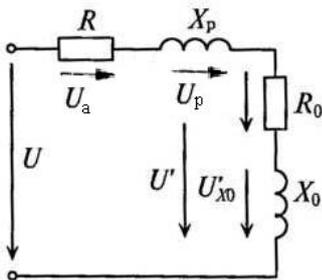


Рисунок 16 - Неразветвленную схему замещения катушки

2 Определим мощность потерь в обмотке катушки (в меди).

$$P_m = I^2 \cdot R = 4^2 \cdot 3 = 48 \text{ Вт}$$

3 Определим мощность потерь в стали.

$$P = P_{ст} + P_m;$$
$$P_{ст} = P - P_m = 100 - 48 = 52 \text{ Вт}$$

4 Эквивалентное сопротивление в схеме замещения, вызывающее потери, равные потерям в стали.

$$R_0 = \frac{P_{ст}}{I^2} = \frac{52}{4^2} = 3,25 \text{ Ом}$$

5 Полное сопротивление всей цепи.

$$Z = U / I = 120 / 4 = 30 \text{ Ом.}$$

6 Определяем величину индуктивного сопротивления X_0 из схемы замещения катушки, воспользовавшись формулой.

$$Z = \sqrt{(R + R_0)^2 + (X_p + X_0)^2}$$

$$X_0 = \sqrt{Z^2 - (R + R_0)^2} - X_p = \sqrt{30^2 - (3 + 3.25)^2} - 1.5 = 27.84 \text{ Ом}$$

7 Э.Д.С. катушки, наводимая основным магнитным потоком Φ_{\max} , и составляющая общего напряжения, уравнивающая эту Э.Д.С.

$$E = U' = I \cdot Z_0 = I \cdot \sqrt{R_0^2 + X_0^2} = 4 \cdot \sqrt{3.25^2 + 27.84^2} \approx 112 \text{ В}$$

8 Составляющая тока, обусловленная потерями в стали, I_a

$$I_a = \frac{P_{ст}}{U'} = \frac{52}{112} = 0.464 \text{ A}$$

9 Намагничивающая составляющая тока. $I_{\mu} = I_p$.

$$I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2} = \sqrt{4^2 - 0.464^2} = 3.98 \text{ A}$$

10 Угол потерь δ .

$$\delta = \arctg \varphi = \frac{I_a}{I_p} = \arctg \frac{0.464}{3.98} = 6.6^\circ$$

11 Для построения векторной диаграммы определим падение напряжения на сопротивлениях R и X_p (рис. 16).

$$U_a = I \cdot R = 4 \cdot 3 = 12 \text{ B}$$

$$U_p = IX_p = 4 \cdot 1.5 = 6 \text{ B}$$

Выбираем масштабы тока M_I, напряжения M_U и строим полную векторную диаграмму катушки со стальным сердечником.

$$\vec{U} = \vec{U}' + \vec{U}_a + \vec{U}_p$$

При построении векторной диаграммы учтите, что векторы \vec{U}_a и \vec{I} совпадают по фазе, т. е. параллельны друг другу; вектор напряжения \vec{U}_p опережает вектор тока, а следовательно, и вектор напряжения \vec{U}' а по фазе на угол $\pi / 2$. (рис. 17)

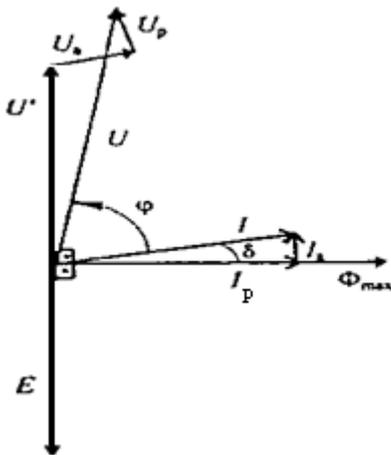


Рисунок 17 – Векторная диаграмма

12 Параметры разветвленной схемы замещения катушки со сталью (рис.15 б) определите из формул:

$$g_0 = \frac{I_a}{U'} \quad \text{или} \quad g_0 = \frac{R_0}{R_0^2 + X_0^2}$$

$$b_0 = \frac{I_p}{U'} \quad \text{или} \quad b_0 = \frac{X_0}{R_0^2 + X_0^2}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №1

Задача 1. На рисунке 18 изображена схема сложной электрической цепи: E_1, E_2 – э.д.с. источников энергии; R_{01}, R_{02} – их внутренние сопротивления; R_1, R_2, R_3 – сопротивления резисторов.

Числовые значения этих параметров указаны в таблице 6

Начертить схему цепи; показать направление токов в ветвях. Определить токи ветвей I_1, I_2, I_3 . Метод расчета указан в таблице.

Проверить решение методом узлового напряжения.

Составить уравнение баланса мощностей

Указание:

Перед решением задачи изучите методические указания к решению задачи и решение типовых примеров 1, 2, 3.

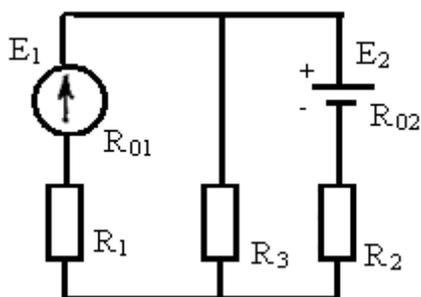


Рисунок 18 - Электрическая схема

Таблица 6 - Исходные данные к задаче 1

№ вар	$E_1, В$	$E_2, В$	$R_{01}, Ом$	$R_{02}, Ом$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	Метод расчета
1	100	90	2,0	1,0	18,0	9	14,0	Метод узловых и контурных уравнений
2	90	87	0,3	0,2	1,7	14,0	2,8	Метод контурных токов
3	120	56	0,2	0,1	4,8	2,8	6,0	Метод узловых и контурных уравнений
4	160	68	2,0	2,0	15,0	6,0	3,9	Метод контурных токов
5	210	80	0,5	0,5	4,5	3,9	4,5	Метод узловых и контурных уравнений
6	80	180	3,0	2,0	19,0	4,5	14,0	Метод контурных токов
7	85	135	1,0	1,0	17,0	14,0	13,0	Метод узловых и контурных уравнений
8	55	90	2,0	2,0	8,0	13,0	7,0	Метод контурных токов
9	105	120	2,0	3,0	18,0	7,0	13,0	Метод узловых и контурных уравнений
10	80	200	1,0	1,0	9,0	13,0	24,0	Метод контурных токов
11	110	120	0,4	1,7	14,0	24,0	6,0	Метод узловых и контурных уравнений
12	95	146	0,5	2,3	2,8	6,0	30,0	Метод контурных токов

№ вар	$E_1, В$	$E_2, В$	$R_{01}, Ом$	$R_{02}, Ом$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	Метод расчета
13	76	34	1,0	1,5	6,0	30,0	17,0	Метод узловых и контурных уравнений
14	28	128	2,0	2,0	3,9	17,0	20,0	Метод контурных токов
15	120	60	0,5	0,3	4,5	20,0	30,0	Метод узловых и контурных уравнений
16	36	90	0,2	0,2	14,0	30,0	10,0	Метод контурных токов
17	40	46	0,3	2,0	13,0	10,0	12,0	Метод узловых и контурных уравнений
18	54	90	0,7	0,5	7,0	12,0	6,0	Метод контурных токов
19	45	87	0,9	3,0	13,0	6,0	50,0	Метод узловых и контурных уравнений
20	78	56	0,6	1,0	24,0	50,0	20,0	Метод контурных токов
21	100	68	2,5	2,0	6,0	20,0	13,0	Метод узловых и контурных уравнений
22	90	80	2,0	2,0	30,0	13,0	4,5	Метод контурных токов
23	120	180	1,7	1,0	17,0	4,5	6,0	Метод узловых и контурных уравнений
24	160	135	2,3	0,4	20,0	6,0	14,0	Метод контурных токов
25	210	90	1,5	0,5	30,0	14,0	30,0	Метод узловых и контурных уравнений
26	80	120	2,0	1,0	10,0	2,8	10,0	Метод контурных токов
27	85	200	0,3	2,0	12,0	1,7	12,0	Метод узловых и контурных уравнений
28	55	120	0,2	0,5	6,0	15,0	6,0	Метод контурных токов
29	105	146	2,0	2,0	50,0	4,5	50,0	Метод узловых и контурных уравнений
30	80	34	0,5	0,3	20,0	19,0	20,0	Метод контурных токов

Задача 2. На рис. 19 приведена неразветвленная схема электрической цепи переменного синусоидального тока. Исходные данные к задаче приведены в таблице 1. Определить напряжения на отдельных элементах цепи и всей цепи. Построить векторную топографическую диаграмму напряжений.

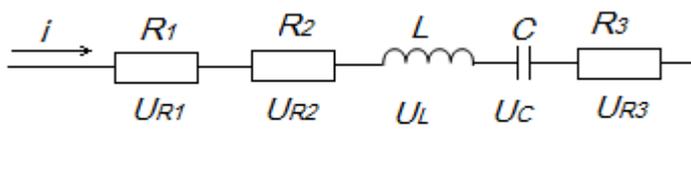


Рисунок 19– Электрическая схема

Таблица 1 - Исходные данные к задаче

Вариант	R ₁	R ₂	L	C	R ₃	U _{R1}	U _{R3}
	Ом	Ом	Гн	мкФ	Ом	В	В
1	8	15	0,0318	159	10	80	
2	10	20	0,0636	318	12	100	
3	10	25	0,0478	127	12	100	
4	12	10	0,0318	159	6	120	
5	12	15	0,0636	636	6	-	60
6	6	25	0,0478	106	8	-	80
7	6	10	0,0636	212	8	-	80
8	8	15	0,0636	79,6	10	-	100
9	8	20	0,0478	318	10	-	100
10	10	20	0,096	79,6	12	100	-
11	10	10	0,0636	318	12	100	-
12	12	15	0,0636	127	6	120	-
13	6	20	0,096	159	6	120	-
14	6	25	0,0478	159	8	60	-
15	8	10	0,0318	636	8	-	80
16	8	15	0,0636	106	10	-	100
17	10	20	0,0318	636	10	-	100
18	10	25	0,0478	79,8	12	-	120
19	12	10	0,096	212	12	-	120
20	8	10	0,0478	636	10	80	-
21	8	15	0,0318	159	10	80	
22	10	20	0,0636	318	12	100	
23	10	25	0,0478	127	12	100	
24	12	10	0,0318	159	6	120	
25	12	15	0,0636	636	6	-	60
26	6	25	0,0478	106	8	-	80
27	6	10	0,0636	212	8	-	80
28	8	15	0,0636	79,6	10	-	100
29	8	20	0,0478	318	10	-	100
30	10	20	0,096	79,6	12	100	-

Методические указания

Рекомендуемая последовательность решения и расчетные формулы:

- вычисляют индуктивное и емкостное сопротивления цепи

$$x_L = \omega \cdot L \quad x_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

где ω – угловая частота переменного тока, $\omega=314 \text{ с}^{-1}$ (при вычислении x_C размерность емкости C – Фарада, $1\text{Ф}=10^6 \text{ мкФ}$)

- вычисляют полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (x_L - x_C)^2}$$

- вычисляют действующее значение тока в цепи по закону Ома

$$I = \frac{U_{R1}}{R_1} \qquad I = \frac{U_{R3}}{R_3}$$

- вычисляют напряжения на отдельных элементах цепи и всей цепи в комплексной форме

$$U = Z \cdot I$$

$$U_{R1} = R_1 I \qquad U_{R2} = R_2 I \qquad U_L = x_L I \qquad U_C = x_C I \qquad U_{R3} = R_3 I$$

- выполняют проверку

$$U = \sqrt{(U_{R1} + U_{R2} + U_{R3})^2 + (U_L - U_C)^2}$$

- вычисляют полную мощность всей цепи и мощность на отдельных элементах цепи

$$S = U \cdot I = Z \cdot I^2$$

- активная мощность

$$P_1 = I^2 \cdot R_1 \qquad P_2 = I^2 \cdot R_2 \qquad P_3 = I^2 \cdot R_3 \qquad P = P_1 + P_2 + P_3$$

- реактивная мощность

$$Q_L = I^2 \cdot x_L \qquad Q_C = I^2 \cdot x_C \qquad Q = Q_L - Q_C$$

- выполняют проверку

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

При построении векторной топографической диаграммы напряжений первоначально откладывают в масштабе (m_i) вектор тока \vec{I} ($\psi_i = 0$) в положительном направлении оси вещественных чисел, затем откладывают в масштабе (m_u)

вектора напряжения U_{R1} ; U_{R2} ; U_L ; U_C ; U_{R3} . Замыкающий вектор U является вектором напряжения, приложенного к цепи

Задача 3. На рисунке 20 показана трехфазная сеть, питающая две нагрузки, одна из которых соединена звездой, а другая – треугольником. Система линейных напряжений симметрична $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{л}$

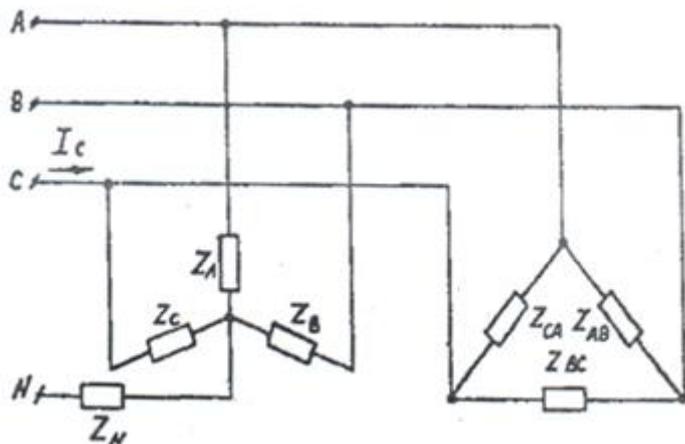


Рисунок 20 - Трехфазная сеть, питающая две нагрузки

Определить:

- фазные и линейные токи обеих нагрузок;
- токи в проводах линии, питающей обе нагрузки;
- ток в нейтральном проводе;
- активную и реактивную мощности каждой из нагрузок и всей установки.

В масштабе построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Задачу решить графическим методом.

Все необходимые данные приведены в таблице 8.

Указания:

Перед решением задачи изучите методические указания к решению задачи 3 и решение типового примера 5.

Нагрузка, коэффициент мощности которой $\cos\varphi$ не равен единице, имеет активно-индуктивный характер.

Таблица 8-Исходные данные к задаче 3

№ вар	U В	Приемник энергии, соединенный «звездой»					Приемник энергии, соединенный «треугольником»			
		Z_N Ом	мощности фаз в Вт и коэффициент мощности				мощности фаз в Вт и коэффициент мощности			
			P_A	P_B	P_C	$\cos\varphi^Y$	P_{AB}	P_{BC}	P_{CA}	$\cos\varphi^\Delta$
1	380	0	4400	3300	3300	1,000	3800	3800	3800	0,500
2	380	∞	4200	4200	4200	0,707	3000	4000	4500	1,000
3	660	∞	7600	7600	7600	0,800	5700	6000	7200	1,000
4	220	0	4400	3800	5700	1,000	4000	4000	4000	0,600
5	380	0	6600	5700	4400	1,000	5200	5200	5200	0,800
6	380	∞	6600	6600	6600	0,600	7000	6500	6000	1,000
7	2200	0	2200	3300	1100	1,00	3800	3800	3800	0,707

№ вар	U В	Приемник энергии, соединенный «звездой»					Приемник энергии, соединенный «треугольником»				
		Z _N Ом	мощности фаз в Вт и коэффициент мощности				мощности фаз в Вт и коэффициент мощности				
			P _A	P _B	P _C	cosφ ^Y	P _{AB}	P _{BC}	P _{CA}	cosφ ^Δ	
8	660	∞	7000	7000	7000	0,707	5700	7600	5700	1,000	
9	380	0	4400	3300	2200	1,000	4800	4800	4800	0,866	
10	660	∞	3800	3800	3800	0,500	6600	3300	6600	1,000	
11	380	0	4400	4200	3300	0,600	6000	6000	6000	1,000	
12	380	∞	2200	2200	2200	1,000	5200	3800	7200	0,800	
13	660	0	3800	6600	1100	0,500	7000	7000	7000	1,000	
14	220	∞	3800	3800	3800	0,707	4200	1100	3300	1,000	
15	380	0	4200	1100	3300	1,000	5200	5200	5200	0,600	
16	380	∞	7600	7600	7600	1,000	3300	2200	6600	0,500	
17	220	0	3300	2200	6600	0,600	3300	3300	3300	1,000	
18	660	∞	6600	6600	6600	1,000	7600	2600	3300	0,707	
19	380	0	7600	2600	3300	0,707	2600	2600	2600	1,000	
20	660	∞	7000	7000	7000	1,000	3300	4200	2200	0,600	
21	380	0	3300	4200	2200	0,500	4200	4200	4200	1,000	
22	380	∞	1300	1300	1300	0,800	7000	4200	2700	1,000	
23	660	0	7000	4200	2700	1,000	2700	2700	2700	0,500	
24	220	∞	2600	2600	2600	0,600	1300	2200	4400	1,000	
25	380	0	1300	2200	4400	1,000	5700	5700	5700	0,600	
26	380	∞	5700	5700	5700	0,500	3300	2600	1300	1,000	
27	220	0	3300	2600	1300	0,707	1300	1300	1300	1,000	
28	660	∞	4400	4400	4400	1,000	4400	1100	6600	0,800	
29	380	0	4200	1100	6600	0,800	4200	4200	4200	1,000	
30	220	0	1300	1100	3300	1	4400	4400	4400	0,5	

Задача 4. Для схемы, изображенной на соответствующем рисунке, заданы уравнения несинусоидального тока или напряжения, параметры элементов цепи.

Найти выражение мгновенных значений тока или напряжения, активную, реактивную и полную мощности, эквивалентный угол сдвига фаз между током и напряжением цепи.

Все необходимые данные приведены в таблице 9

Указание:

Перед решением задачи изучите методические указания к решению задачи 4 и решение типового примера 6.

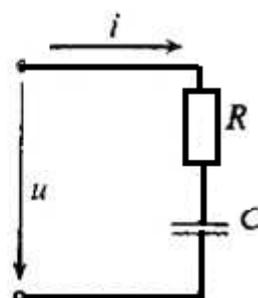
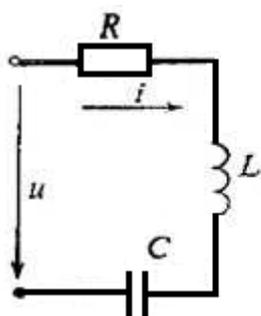


Схема 1

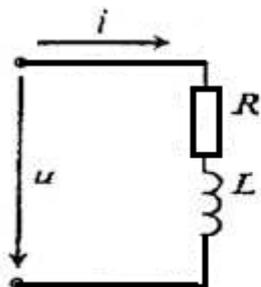


Схема 2

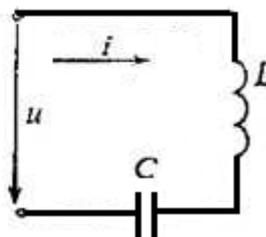


Схема 3

Схема 4

Таблица 9 – Исходные данные к задаче 4

№ вар	№ схемы	R, Ом	L, Гн	C, мкФ	Уравнение несинусоидального тока (напряжения), А (В)
1	1	12	0,0383	796,18	$u = 380 + 220\sin 314t + 110\sin 942t$
2	2	18	-	132,70	$i = 10 \sin 314t + 2\sin 942t$
3	3	16	0,0382	-	$i = 10 \sin 314t + 8 \sin 942t$
4	4	16	0,0764	265,39	$u = 200 + 15\sin 314t + 10\sin 628t$
5	1	18	0,0478	187,34	$i = 10\sin 314t + 6\sin 942t$
6	2	12	-	132,70	$i = 10\sin 314t + 5\sin 942t$
7	3	24	0,0383	-	$u = 500 + 600\sin 314t + 400\sin 628t$
8	4	16	0,0382	265,39	$u = 400 + 200\sin 314t + 150\sin 942t$
9	1	4	0,0096	318,47	$u = 100 + 110\sin 314t + 80 \sin 628t$
10	2	3	-	796,18	$u = 500 + 250\sin 314t + 150\sin 942t$
11	3	6	0,0255	-	$u = 200 + 110\sin 314t + 50\sin 942t$
12	4	6	0,0382	796,18	$i = 15\sin 314t + 8\sin 942t$
13	1	24	0,0478	187,34	$i = 22\sin 314t + 10\sin 942t$
14	2	3	-	796,18	$i = 8\sin 314t + 4\sin 942t$
15	3	18	0,0764	-	$u = 100 + 100\sin 314t + 60\sin 942t$
16	4	16	0,0255	132,7	$i = 15\sin 314t + 2\sin 942t$
17	1	15	0,0102	318,47	$u = 200 + 100\sin 314t + 40\sin 942t$
18	2	18	-	132,68	$u = 300 + 200\sin 314t + 100 \sin 628t$
19	3	13	0,0484	-	$i = 10\sin 314t + 5 \sin 942t + 3 \sin 1256t$
20	4	17	0,0573	63,7	$u = 140 + 120\sin 314t + 60\sin 942t$
21	1	10	0,0199	530,78	$u = 220 + 127\sin 314t + 110\sin 942t$
22	2	5	-	425,58	$i = 15\sin 314t + 10\sin 942t$
23	3	2	0,011	-	$i = 18 + 15\sin 314t + 12\sin 628t$
24	4	21	0,0364	318,47	$i = 18\sin 314t + 9\sin 942t$
25	1	14	0,0309	289,52	$u = 380 + 200\sin 314t + 100\sin 942t$
26	2	19	-	132,68	$i = 15\sin 314t + 10\sin 942t$
27	3	23	0,0764	-	$u = 500 + 300\sin 314t + 150\sin 942t$
28	4	27	0,0199	530,78	$i = 10\sin 314t + 5\sin 942t$

29	1	9	0,0364	318,47	$u=100\sin 314t + 50\sin 628t$
30	2	16	0,0764	265,39	$u= 380+220\sin 314t + 110\sin 942t$

Задача 5.

Для катушки, намотанной на сердечник из электротехнической стали, определить все необходимые данные для построения векторной диаграммы и обеих схем замещения (неразветвленной и разветвленной) с учетом активного сопротивления катушки R и магнитного рассеяния X_p . Величина тока в катушке I , подводимое переменное напряжение U , активная мощность потерь в катушке P . Все необходимые данные приведены в таблице 10.

В масштабе построить полную векторную диаграмму катушки со сталью, соблюдая требования ГОСТа, начертить обе схемы замещения.

Указания:

Перед решением задачи изучите методические указания к решению задачи 5 и решение типового примера 7.

Схемы замещения катушки представлены на рис. 15.

Таблица 10 – Исходные данные к задаче 5

Вариант	R , Ом	X_p , Ом	U , В	I , А	P , Вт
1	1	1,5	100	8,5	170
2	2	3,0	110	6,0	135
3	3	4,0	120	4,0	90
4	4	6,0	100	3,0	65
5	5	7,0	120	3,0	80
6	6	8,0	100	2,0	45
7	7	10,0	200	4,0	180
8	8	12,0	220	5,0	300
9	9	14,0	220	4,0	220
10	10	16,0	150	3,0	130
11	1	1,5	100	8,5	170
12	2	3,0	110	6,0	135
13	3	4,0	120	4,0	90
14	4	6,0	100	3,0	65
15	5	7,0	120	3,0	80
16	6	8,0	100	2,0	45
17	7	10,0	200	4,0	180
18	8	12,0	220	5,0	300
19	9	14,0	220	4,0	220
20	10	16,0	150	3,0	130
21	1	1,5	100	8,5	170
22	2	3,0	110	6,0	135
23	3	4,0	120	4,0	90
24	4	6,0	100	3,0	65
25	5	7,0	120	3,0	80
26	6	8,0	100	2,0	45
27	7	10,0	200	4,0	180
28	8	12,0	220	5,0	300
29	9	14,0	220	4,0	220
30	10	16,0	150	3,0	130

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПЕРЕЧЕНЬ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ ВОПРОСОВ

1. Понятие о строении вещества. Что представляет собой электрическое поле? Каково условное изображение электрического поля? Взаимодействие заряженных тел. Сформулируйте и запишите формулу для определения силы взаимодействия двух точечных электрических зарядов.
2. Дать определение напряженности. Записать формулу и пояснить все величины, входящие в нее. Привести примеры определения напряженности электрического поля одного и нескольких зарядов.
3. Поясните физический смысл понятия “электрический потенциал”. Возникновение эквипотенциальных поверхностей. Поясните физический смысл понятия “электрическое напряжение”. Влияние шагового напряжения на безопасность человека.
4. Дайте определение конденсатора? Приведите классификацию конденсаторов в зависимости от типа диэлектрика? Поясните зависимость емкости от геометрических размеров. Обозначение конденсатора на схеме.
5. Поясните, в чем заключается физическая сущность электрической емкости. Приведите формулу для определения емкости плоского конденсатора.
6. Перечислите известные Вам способы соединения конденсаторов. Определите эквивалентную емкость при смешанном соединении трех конденсаторов.
7. Дайте количественную и качественную характеристику понятия “электрический ток”, Как Вы понимаете понятие “плотность тока” и где на практике оно применяется?
8. Что называется электрическим сопротивлением и как оно обозначается в схемах? В чем различие между резисторами и реостатами? Для чего вводится понятие удельное сопротивление и что оно означает? Как зависит сопротивление проводника от его геометрических размеров, материала проводника и изменения температуры?
9. Дайте определение электрического сопротивления и проводимости. В чем различие между резисторами и реостатами? Как связаны между собой электрическое сопротивление и проводимость?
10. Дайте определение сопротивления. Поясните влияние изменения температуры на величину сопротивления. Приведите пример. Существуют ли сплавы сопротивление которых практически не зависит от температуры. Если существуют, то приведите примеры.
11. Составьте простейшую электрическую цепь. Поясните назначение элементов схемы. Дайте определение электродвижущей силе источника. Напряжение на зажимах источника. Приведите формулу, выражающую закон сохранения энергии. Режимы работы источника
12. Составьте схему цепи постоянного тока, состоящую из смешанного соединения пяти резисторов. Определите эквивалентное сопротивление цепи.

13. Сформулируйте и запишите формулу закона Ома для участка цепи. Сформулируйте и запишите формулу закона Ома для полной цепи. Составьте схему цепи постоянного тока и примените законы Ома.
14. Составьте схему цепи постоянного тока, состоящую из двух контуров, в состав которых входят два источника и три резистора. Составьте для данной схемы уравнения по законам Кирхгофа.
15. Дайте определение работы и мощности электрического тока. Приведите формулы для определения этих величин. Укажите, в каких единицах они измеряются? Что Вы понимаете под понятием «баланс мощности»? Поясните, как определяется К.П.Д. источника.
16. Дайте определение последовательного соединения резисторов. Составьте схему трех последовательно соединенных резисторов и определите общее сопротивление цепи, падение напряжения на каждом резисторе. Сформулируйте закон Ома для участка цепи. Почему изменение сопротивления одного из последовательно включенных приемников влечет за собой изменение тока в цепи?
17. Составьте схему цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов. Определите ток в каждой ветви и в неразветвленном участке цепи? Сформулируйте закон Кирхгофа для узла.
18. Поясните процесс нагревания проводников электрическим током. Сформулируйте закон Джоуля – Ленца. Задайтесь мощностью, напряжением потребителя и выберите сечения провода по длительно допустимому току. Защита проводов от больших токов.
19. Составьте алгоритм расчета сложных цепей методом контурных токов. Приведите пример
20. Составьте алгоритм расчета сложных цепей методом узловых и контурных уравнений. Приведите пример
21. Поясните понятие «магнетизм». Приведите классификацию магнитных материалов. Перечислите и охарактеризуйте основные характеристики магнитного поля.
22. Дайте определения магнитной индукции и магнитного потока. Как определяется направление индукции? Приведите формулы для определения индукции и потока. Поясните понятие «потокосцепление»
23. Сформулируйте определение напряженности магнитного поля. Как связаны напряженность и магнитная индукция. Привести и пояснить общую формулу закона полного тока.
24. Поясните, как определить направление магнитного поля, возбужденного вокруг и проводника с током? Что Вы можете рассказать о поведении проводника с током в магнитном поле? Сформулируйте правило для определения направления движения проводника в магнитном поле
25. Дайте определение магнитного поля. Приведите графическое изображение поля. Сформулируйте правило для определения направления магнитного поля, возбужденного вокруг прямолинейного и кругового проводника с током. Приведите формулу для определения силы, действующей на проводник в магнитном поле.
26. Как определяется направление движения проводника с током в магнитном поле? Что представляет собой магнитная индукция и каково ее направление? По какой

формуле рассчитывается сила, действующая на проводник с током в магнитном поле?

27. Объясните взаимодействие проводников с токами. От каких величин и как зависит сила взаимодействия между проводниками? Каково практическое применение этого явления? Приведите формулу для определения силы взаимодействия между проводниками и поясните все величины, входящие в нее.
28. Расскажите о появлении ЭДС индукции в проводнике, перемещающемся в магнитном поле. Сформулируйте правило для определения ЭДС индукции. Примените это правило на практике.
29. Что представляет собой электромагнитная индукция? По каким правилам и как определяется направление Э.Д.С. индукции или индукционного тока? Как определяется индуктивность цепи при последовательном включении индуктивно связанных катушек.
30. Поясните возникновение вихревых токов и их вредное влияние. Как ослабляют влияние вихревых токов? От чего зависят потери энергии от вихревых токов? Где нашли применение вихревым токам?
31. Поясните процесс возникновения самоиндукции. Как можно устранить самоиндукцию? В чем заключается физическая сущность индуктивного сопротивления катушки. Что представляет собой коэффициент пропорциональности L , как он определяется и в каких единицах измеряется?
32. Расскажите о преобразовании энергии. На каком явлении основан принцип работы электрических машин. Поясните принцип действия электрического генератора и двигателя.
33. Перечислите и дайте определения основным характеристикам переменного тока. Запишите аналитическое выражение для тока. Как определяются мгновенное и амплитудное значения тока?
34. Дайте определения активной, реактивной и полной мощности. В каких единицах они измеряются? Сравните процесс преобразования энергии активными и реактивными сопротивлениями. Что Вы понимаете под коэффициентом мощности? В чем заключается его технико-экономическое значение. Приведите возможные способы повышения коэффициента мощности.
35. Составьте схему, содержащую активное сопротивление. Напишите аналитическое выражение тока и напряжения для данной цепи. Приведите временные графики тока и напряжения. Составьте векторную диаграмму. Запишите закон Ома для данной цепи. Поясните сущность явления поверхностного эффекта
36. Составьте схему, содержащую индуктивное сопротивление. Напишите аналитическое выражение тока и напряжения для данной цепи. Приведите временные графики тока и напряжения. Составьте векторную диаграмму. Запишите закон Ома для данной цепи.
37. Составьте схему, содержащую емкостное сопротивление. Напишите аналитическое выражение тока и напряжения для данной цепи. Приведите временные графики тока и напряжения. Составьте векторную диаграмму. Запишите закон Ома для данной цепи.

38. Цепь переменного тока, содержащая активное и емкостное сопротивления. Составить схему, векторную диаграмму токов и напряжений, треугольник сопротивлений. Записать формулы для определения падения напряжения на каждом элементе цепи, полного сопротивления и тока в цепи.
39. Цепь переменного тока, содержащая активное и индуктивное сопротивления. Составить схему, векторную диаграмму токов и напряжений, треугольник сопротивлений. Записать формулы для определения падения напряжения на каждом элементе цепи, полного сопротивления и тока в цепи. Пояснить величины входящие в формулы и указать их единицы измерения
40. Цепь переменного тока, содержащая активное, индуктивное и емкостное сопротивления. Составить схему, векторную диаграмму токов и напряжений, треугольник сопротивлений. Записать формулы для определения падения напряжения на каждом элементе цепи, полного сопротивления и тока в цепи.
41. Составьте схему цепи переменного тока с последовательным соединением реактивных сопротивлений. Дайте определение резонанса напряжений. Укажите условия его получения и сформулируйте признаки резонанса напряжений. Поясните физический смысл резонанса. Каково его практическое применение?
42. Составить схему цепи переменного тока с параллельным соединением реальной катушки индуктивности и реального конденсатора. Как определяются токи в параллельно соединенных приемниках энергии (привести пример).
43. Составить схему параллельного соединения двух реальных катушек индуктивности. На примере поясните определение полного сопротивления и токов участков символическим методом.
44. Параллельное соединение реактивных сопротивлений. Как определяется ток в неразветвленном участке цепи?
45. Составьте схему параллельного соединения реактивных сопротивлений. Дайте определение резонанса токов. Укажите условия его получения и сформулируйте признаки резонанса токов. Поясните физический смысл резонанса. Поясните, как влияет резонанс токов на коэффициент мощности?
46. Объясните схемы соединения обмоток генератора. Дайте определение линейных и фазных токов и напряжений. Поясните назначение нулевого провода? Как определить ток в нулевом проводе? Чему равен ток в нулевом проводе при равномерной нагрузке?
47. Составьте схему соединения приемников энергии треугольником. Дайте определение фазных и линейных токов и напряжений. Приведите соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами. Приведите векторную диаграмму и поясните нахождение линейных токов по ней.
48. Составьте схему соединения обмоток трехфазного генератора звездой. Дайте определение фазных и линейных токов, напряжений и соотношений между ними. Приведите векторную диаграмму соединения.
49. Составьте схему соединения трехфазного потребителя несимметричной звездой. Поясните причину возникновения напряжения смещения. Приведите векторную диаграмму соединения.

50. Приведите формулы для определения мощности трехфазной цепи при соединении «звездой» и «треугольником» при симметричной и несимметричной нагрузке? Какими приборами измеряют мощность и как их подключают при равномерной и неравномерной нагрузке?
51. Поясните физический смысл понятия «коэффициент мощности». В чем заключается его технико-экономическое значение. Перечислите и поясните способы повышения коэффициента мощности.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

Основные источники:

1. Бутырин П.А. Основы электротехники [Электронный ресурс]: учебник для студентов средних и высших учебных заведений профессионального образования по направлениям электротехники и электроэнергетики/ Бутырин П.А., Толчеев О.В., Шакирзянов Ф.Н.— Электрон. текстовые данные.— М.: Издательский дом МЭИ, 2014.— 360 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/33220.html>.— ЭБС «IPRbooks»

2. Горденко Д.В. Электротехника и электроника [Электронный ресурс]: практикум/ Горденко Д.В., Никулин В.И., Резеньков Д.Н.— Электрон. текстовые данные.— Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018.— 123 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/70291.html>.— ЭБС «IPRbooks»

3. Дементьев Ю.Н. Электротехника и электроника. [Электронный ресурс]: учебное пособие для СПО/ Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А.— Электрон. текстовые данные.— Саратов: Профобразование, 2017.— 223 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66403.html>.— ЭБС «IPRbooks»

4. Немцов М.В. Электротехника и электроника [Электронный ресурс]: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М.В. Немцов, М.Л. Немцова. – М.: Издательский центр «Академия», 2018.- 432с.

5. Шандриков А.С. Электротехника с основами электроники [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Шандриков А.С.— Электрон. текстовые данные.— Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016.— 320 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67801.html>.— ЭБС «IPRbooks»

Дополнительные источники:

1 ГОСТ Р 52002 - 2003 Электротехника. Термины и определения основных понятий

2 ГОСТ 1494-77 Электротехника. Буквенное обозначение основных величин

1. Ресурс <http://elektroinf.narod.ru/> Библиотека электроэнергетика
2. Ресурс <http://rusbuk.ru/> учебники по Электротехнике и электронике
3. Ресурс <https://elektro-montagnik.ru/index.php> - учебно-образовательный сайт.
4. Ресурс <https://www.eleczon.ru/> - учебно-образовательный сайт.
5. Ресурс <http://ru.wikipedia.org> – свободная энциклопедия.