

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАМЧАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»)

КОЛЛЕДЖ

УТВЕРЖДАЮ
Директор колледжа
О.В. Жижикина

«29» 01 2026 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

«Электроника и электротехника»

специальности:
26.02.02 «Судостроение»

Петропавловск-Камчатский
2026

СОДЕРЖАНИЕ

1. ПАСПОРТ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ	3
1.1. Область применения рабочей программы.....	3
1.2. Место учебной дисциплины в структуре программы подготовки специалистов среднего звена	3
1.3. Цели и задачи учебной дисциплины – требования к результатам освоения учебной дисциплины	3
2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ.....	5
3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ.....	5
3.1. Объем учебной дисциплины и виды учебной работы	5
3.2. Тематический план и содержание учебной дисциплины	5
Электронные выпрямители и стабилизаторы	8
3.3. Вопросы итогового контроля знаний.....	9
4. УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ	11
4.1. Требования к минимальному материально-техническому обеспечению	11
4.2. Информационное обеспечение обучения	11
5. КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ ...	13
6. ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ В РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ	14
ПРИЛОЖЕНИЕ А Фонд оценочных средств	15

1. ПАСПОРТ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОП.03 Электроника и электротехника

1.1. Область применения рабочей программы

Рабочая программа учебной дисциплины является частью программы подготовки специалистов среднего звена в соответствии с ФГОС по специальности 26.02.02 «Судостроение».

1.2. Место учебной дисциплины в структуре программы подготовки специалистов среднего звена

Дисциплина общепрофессионального цикла (ОП.03).

1.3. Цели и задачи учебной дисциплины – требования к результатам освоения учебной дисциплины

Цель изучения дисциплины «Электроника и электротехника» для студентов судостроительных специальностей заключается в формировании прочных теоретических знаний и практических навыков, необходимых для понимания принципов работы электронных устройств и электрических машин, применяемых в конструкции судов и морской технике. Освоив данную дисциплину, студенты смогут грамотно проектировать, эксплуатировать и обслуживать электрооборудование морских объектов, обеспечивая безопасность плавания и надежность функционирования судовых систем.

Основные задачи:

- Изучение основных законов электричества и магнетизма, позволяющих анализировать работу простых электрических цепей и сложных схем управления электронными устройствами.
- Формирование базовых понятий о работе полупроводников, диодов, транзисторов и интегральных микросхем, используемых в современной электронной аппаратуре.
- Ознакомление с принципами построения электронных приборов и преобразователей энергии, обеспечивающих управление различными системами судна (электропривод, автоматизация, навигационные системы).
- Обучение основам теории электрических машин постоянного и переменного тока, электродвигателей и генераторов, широко применяемых в судовом оборудовании.
- Развитие умения проводить расчетные исследования простейших электронных схем и выбирать компоненты для конкретных целей.
- Овладение методами измерения и диагностики неисправностей в электрической цепи и устройствах электроники, применяя контрольно-измерительные приборы.
- Подготовка будущих инженеров-судостроителей к грамотному подбору электрооборудования, соответствующего условиям эксплуатации на судах различного назначения.
- Получение опыта проектирования элементов автоматизированных систем контроля и управления техническими процессами на борту судна.

В результате изучения учебной дисциплины обучающийся должен:

уметь:

- распознавать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте, анализировать и выделять её составные части;
- определять этапы решения задачи, составлять план действия, реализовывать составленный план, определять необходимые ресурсы;
- выявлять и эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы;
- владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах;
- оценивать результат и последствия своих действий (самостоятельно или с помощью наставника);

- определять задачи для поиска информации, планировать процесс поиска, выбирать необходимые источники информации;
- выделять наиболее значимое в перечне информации, структурировать получаемую информацию, оформлять результаты поиска;
- оценивать практическую значимость результатов поиска;
- применять средства информационных технологий для решения профессиональных задач;
- использовать современное программное обеспечение в профессиональной деятельности;
- использовать различные цифровые средства для решения профессиональных задач;
- организовывать работу коллектива и команды;
- взаимодействовать с коллегами, руководством, клиентами в ходе профессиональной деятельности;
- грамотно излагать свои мысли и оформлять документы по профессиональной тематике на государственном языке;
- проявлять толерантность в рабочем коллективе;
- понимать общий смысл четко произнесенных высказываний на известные темы (профессиональные и бытовые), понимать тексты на базовые профессиональные темы;
- участвовать в диалогах на знакомые общие и профессиональные темы;
- строить простые высказывания о себе и о своей профессиональной деятельности
- кратко обосновывать и объяснять свои действия (текущие и планируемые);
- писать простые связные сообщения на знакомые или интересующие профессиональные темы;
- использовать программное обеспечение для выполнения расчетов;
- производить расчет экономической эффективности на основе проектируемых технологических процессов в судостроении.

знать:

- актуальный профессиональный и социальный контекст, в котором приходится работать и жить;
- структура плана для решения задач, алгоритмы выполнения работ в профессиональной и смежных областях;
- основные источники информации и ресурсы для решения задач и/или проблем в профессиональном и/или социальном контексте;
- методы работы в профессиональной и смежных сферах;
- порядок оценки результатов решения задач профессиональной деятельности;
- номенклатура информационных источников, применяемых в профессиональной деятельности;
- приемы структурирования информации;
- формат оформления результатов поиска информации;
- современные средства и устройства информатизации, порядок их применения и программное обеспечение в профессиональной деятельности, в том числе цифровые средства;
- психологические основы деятельности коллектива;
- психологические особенности личности;
- правила оформления документов;
- правила построения устных сообщений;
- правила построения простых и сложных предложений на профессиональные темы;
- основные общеупотребительные глаголы (бытовая и профессиональная лексика);
- лексический минимум, относящийся к описанию предметов, средств и процессов профессиональной деятельности;

- особенности произношения
- правила чтения текстов профессиональной направленности
- Правила организации технологической подготовки и управления технологической подготовкой производства, установленные ЕСТПП
- Основы технологии судостроительного производства.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучение дисциплины способствует формированию следующих общих и профессиональных компетенций:

Код	Наименование результата обучения
ОК.01	Выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам
ОК 02	Использовать современные средства поиска, анализа и интерпретации информации и информационные технологии для выполнения задач профессиональной деятельности
ОК 04	Эффективно взаимодействовать и работать в коллективе и команде;
ОК 05	Осуществлять устную и письменную коммуникацию на государственном языке Российской Федерации с учетом особенностей социального и культурного контекста
ОК 09	Пользоваться профессиональной документацией на государственном и иностранном языках.
ПК 1.2	Рассчитывать нормы и регистрировать расход материально-технических, энергетических ресурсов для осуществления технологических процессов судостроения.

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Объем учебной дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Объем часов
Максимальная учебная нагрузка (всего)	54
Обязательная аудиторная учебная нагрузка (всего)	48
в том числе:	
лекции	30
практические занятия	10
лабораторные занятия	8
консультации	–
Самостоятельная работа обучающегося (всего)	6
Промежуточная аттестация	–
Итоговая аттестация 4 семестр – зачет	

3.2. Тематический план и содержание учебной дисциплины ОП.03 Электроника и электротехника

Наименование разделов и тем	Содержание учебного материала, практические занятия, лабораторные работы	Объем часов	ОК/ПК
1	2	3	4
РАЗДЕЛ 1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА			
Тема 1.1. Электрические цепи постоянного тока	Лекции	2	ОК 01 ОК 02
	1 Элементы электрической цепи, их параметры и характеристики. Пассивные и активные элементы электрической цепи.		
	2 Элементы схемы электрической цепи: ветвь, узел, контур. Последовательное, параллельное и смешанное соединения электроприемников.		
	3 Электродвижущая сила (ЭДС). Электрическая проводимость. Резистор. Соединение резисторов.		
	4 Сборка электрических схем. Источники напряжения и тока, их свойства, характеристики и схемы замещения.		
	5 Законы Ома и Кирхгофа. Простые и сложные цепи.		

	6	Режимы работы цепей, баланс мощностей. Потенциальная диаграмма. Основы расчета электрической цепи постоянного тока. Расчет простых электрических цепей.		
	7	Расчет электрических цепей произвольной конфигурации методами: контурных токов, узловых потенциалов, двух узлов (узлового напряжения), метод суперпозиции (наложения) и метод эквивалентного генератора.		
	Практическое занятие 1		2	ОК 04 ОК 05 ПК 1.2
	Расчёт работы и мощности источников и потребителей электрической энергии. Способы соединения. Методы расчёта электрических цепей.			
	Практическое занятие 2		2	ОК 04 ОК 05 ПК 1.2
Расчёт цепей содержащих конденсаторы при различных способах соединения				
Тема 1.2 . Электромагнетизм	Лекции		2	ОК 01 ОК 02 ОК 05
	1	Основные свойства и характеристики магнитного поля. Закон Ампера.		
	2	Индуктивность: собственная и взаимная. Магнитная проницаемость: абсолютная и относительная. Магнитные свойства вещества. Намагничивание ферромагнетика.		
	3	Гистерезис. Электромагнитная индукция. ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции. ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле.		
	4	Магнитные цепи: разветвленные и неразветвленные. Расчет неразветвленной магнитной цепи.		
	5	Электромагнитные силы. Энергия магнитного поля. Электромагниты и их применение.		
	Практическое занятие 3		2	ОК 04 ОК 05 ПК 1.2
Расчёт основных характеристик магнитного поля. Расчёт ЭДС индукции и магнитных цепей				
Тема 1.3 Электрические цепи переменного тока	Лекции		6	ОК 01 ОК 02 ОК 05 ОК 09
	1	Понятие о генераторах переменного тока. Получение синусоидальной ЭДС. Общая характеристика цепей переменного тока. Амплитуда, период, частота, фаза, начальная фаза синусоидального тока. Мгновенное, амплитудное, действующее и среднее значение ЭДС, напряжения, тока.		
	2	Изображение синусоидальных величин с помощью временных и векторных диаграмм.		
	3	Электрическая цепь: с активным сопротивлением; с катушкой индуктивности (идеальной); с емкостью. Векторная диаграмма. Разность фаз напряжения и тока. Неразветвленные электрические RC и RL-цепи переменного тока. Треугольники напряжений, сопротивлений, мощностей.		
	4	Коэффициент мощности. Баланс мощностей. Неразветвленная электрическая RLC-цепь переменного тока, резонанс напряжений и условия его возникновения. Разветвленная электрическая RLC-цепь переменного тока, резонанс токов и условия его возникновения.		
	5	Расчет электрической цепи, содержащей источник синусоидальной ЭДС. Многофазные системы. Получение трехфазной ЭДС. Схемы соединения обмоток генератора и фаз потребителя «звездой». Симметричная и несимметричная нагрузка. Четырех- и трехпроводные системы.		
	6	Фазные, линейные напряжения и токи, соотношения между ними. Векторные диаграммы. Мощность трехфазной цепи. Напряжение смещения нейтрали при соединении звездой. Роль нулевого провода.		
	7	Топографическая диаграмма. Схемы соединения обмоток генератора фаз потребителя «треугольником». Мощность цепи при различных соединениях нагрузки.		
	Практическое занятие 4			

	Расчёт RC-, RL-,RLC-цепей переменного тока при последовательном и параллельном соединении. Резонанса токов и напряжений. Расчёт коэффициента мощности «cos φ»		ОК 04 ОК 05 ПК 1.2
Тема 1.4. Электрические измерения	Лекции		
	1 Основные понятия измерения. Погрешности измерений.		
	2 Классификация электроизмерительных приборов. Измерение тока и напряжения. Приборы и схемы для измерения электрического напряжения.		
	3 Расширение пределов измерения амперметров и вольтметров. Измерение мощности. Электродинамический измерительный механизм.	2	ОК 01 ОК 02 ОК 09
	4 Измерение мощности в цепях постоянного и переменного токов. Измерение электрического сопротивления, измерительные механизмы. Индукционный измерительный механизм.		
	5 Измерение электрической энергии. Косвенные методы измерения сопротивления, методы и приборы сравнения для измерения сопротивления.		
	Практическое занятие 5		
	Электрические измерения и приборы. Расчёт погрешностей измерений.	2	ОК 09 ПК 1.2
Тема 1.5. Трансформаторы	Лекции		
	1 Назначение, принцип действия устройство однофазного трансформатора. Режимы работы трансформатора.		
	2 Номинальные параметры трансформатора: мощность, напряжение токи обмоток. Потери энергии и КПД трансформатора.	2	ОК 01 ОК 02
	3 Типы трансформаторов и их применение: однофазные, трехфазные, многообмоточные. Исследование режимов работы трансформаторов.		
	4 Автотрансформаторы. Измерительные трансформаторы		
Тема 1.6. Электрические машины переменного и постоянного тока	Лекции		
	1 Назначение машин переменного тока и их классификация. Получение вращающегося магнитного поля в трехфазных электродвигателях и генераторах.		
	2 Устройство электрической машины переменного тока: статор и его обмотка, ротор и его обмотка. Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя.		
	3 Частота вращения магнитного поля статора и частота вращения ротора. Вращающий момент асинхронного двигателя. Скольжение. Устройство и принцип действия асинхронного двигателя.		
	4 Физические процессы, проходящие в асинхронном двигателе. Применение асинхронных двигателей.		
	5 Устройство машин постоянного тока. Физические процессы, проходящие в синхронном двигателе. Пуск в ход асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.	4	ОК 01 ОК 02
	6 Рабочий процесс асинхронного двигателя и его механическая характеристика. Регулирование частоты вращения ротора.		
	7 Однофазный и двухфазный асинхронный электродвигатели. Применение электрических машин постоянного тока.		
	8 Синхронные машины и область их применения. Назначение машин постоянного тока и их классификация. Устройство и принцип действия машин постоянного тока: магнитная цепь, коллектор, обмотка якоря		
	9 Рабочий процесс машины постоянного тока: ЭДС обмотки якоря, реакция якоря, коммутация. Обратимость машин.		
	10 Синхронный генератор. Синхронный двигатель. Генераторы постоянного тока, двигатели постоянного тока, общие сведения.		
	11 Пуск в ход, регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока. Потери энергии и КПД машин постоянного тока.		
	Лабораторная работа 1	2	ОК 05

	Исследование рабочих характеристик трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором		ОК 09 ПК 1.2
	Лабораторная работа 2		
	Реверсивный пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	2	ОК 05 ОК 09 ПК 1.2
Тема 1.7. Основы электропривода	Лекции		
	1 Понятие об электроприводе. Уравнение движения электропривода		
	2 Механические характеристики нагрузочных устройств.	2	ОК 01 ОК 02
	3 Расчет мощности и выбор двигателя при продолжительном, кратковременном и повторно -кратковременном режимах.		
	4 Аппаратура для управления электроприводом.		
Тема 1.8. Электрические и магнитные устройства автоматики	Лекции		
	1 Структура системы автоматического контроля, управления и регулирования.		
	2 Измерительные преобразователи.	2	ОК 01 ОК 02
	3 Измерение неэлектрических величин электрическими методами.		
	4 Параметрические преобразователи: резистивные, индуктивные, емкостные.		
	5 Генераторные преобразователи.		
РАЗДЕЛ 2. Электроника			
Тема 2.1. Физические основы электроники. Электронные приборы	Лекции		
	1 Электропроводимость полупроводников. Собственная и примесная проводимость. Электронно-дырочный переход и его свойства. Прямое и обратное включение "р-п" перехода.		
	2 Полупроводниковые диоды: классификация, свойства, маркировка, область применения.	2	ОК 01 ОК 02 ОК 04
	3 Полупроводниковые транзисторы: классификация, принцип действия, назначение, область применения, маркировка.		
	4 Биполярные транзисторы. Физические процессы в биполярном транзисторе. Схемы включения биполярных транзисторов: общая база, общий эмиттер, общий коллектор.		
	5 Вольтамперные характеристики, параметры схем. Статические параметры, динамический режим работы, температурные и частотные свойства биполярных транзисторов		
	6 Полевые транзисторы. классификация, принцип действия, назначение, область применения.		
	7 Тиристоры. классификация, принцип действия, назначение, область применения.		
	Лабораторная работа 3		
	Исследование входных и выходных вольтамперных характеристик биполярного транзистора. Проверка проводимости диода. Изучение работы биполярного транзистора, тиристора	2	ОК 05 ОК 09 ПК 1.2
Тема 2.2 Электронные выпрямители и стабилизаторы	Лекции		
	1 Основные сведения, структурная схема электронного выпрямителя.		
	2 Однофазные и трехфазные выпрямители. Сглаживающие фильтры.	2	ОК 01 ОК 02
	3 Основные сведения, структурная схема электронного стабилизатора. Стабилизаторы напряжения. Стабилизаторы тока.		
	4 Изучение логических интегральных микросхем, проверка логических схем, как элементов системы электрооборудования машин		
	Лабораторная работа 4		
	Исследование входного напряжения однополупериодного и двухполупериодного выпрямителя с помощью осциллографа.	2	ОК 09 ПК 1.2
Тема 2.3 Электронные усилители	Лекции		
	1 Схемы усилителей электрических сигналов. Основные технические характеристики электронных усилителей. Принцип работы усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе.	2	ОК 01 ОК 02

	2	Обратная связь в усилителях. Многокаскадные усилители. Температурная стабилизация режима работы усилителя.		
	3	Исследование амплитудной и амплитудно-частотной характеристик однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе		
	4	Исследование амплитудной и амплитудно-частотной характеристик однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе		
Тема 2.4 Электронные генераторы и измерительные приборы	Лекции			
	1	Колебательный контур. Структурная схема электронного генератора. Генераторы синусоидальных колебаний; генераторы LC-типа, генераторы RC-типа. Импульсные генераторы: мультивибратор, триггер.	2	ОК 01 ОК 02
	2	Генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН - генератор). Электронные стрелочные и цифровые вольтметры. Электронный осциллограф.		
Самостоятельная работа			6	
Промежуточная аттестация – зачет			–	
ИТОГО			54	

3.3. Вопросы итогового контроля знаний

1. Что такое пассивный элемент электрической цепи?
2. Чем отличаются последовательное и параллельное соединение электроприемников?
3. Дайте определение закона Ома.
4. Объясните закон Кирхгофа для замкнутых контуров.
5. Какие существуют способы соединений резисторов?
6. Приведите формулу баланса мощностей в электрической цепи.
7. Для чего используется потенциальная диаграмма?
8. Как рассчитывается простая электрическая цепь постоянного тока?
9. Опишите метод эквивалентного генератора.
10. Как определить напряжение узла в сложной схеме методом узловых потенциалов?
11. Какой физический смысл имеет магнитная проницаемость?
12. Запишите закон электромагнитной индукции Фарадея.
13. Что называется гистерезисом?
14. От чего зависит величина ЭДС взаимной индукции?
15. Как рассчитываются неразветвленные магнитные цепи?
16. Что является источником электромагнитных сил?
17. Где применяются электромагниты?
18. Обоснуйте энергетику магнитного поля.
19. Укажите отличительную особенность ферромагнетиков.
20. Объясните, почему возникает эффект гистерезиса?
21. Дайте понятие амплитуды и периода синусоидального сигнала.
22. Почему векторные диаграммы удобны для анализа цепей переменного тока?
23. Как влияет активное сопротивление на сдвиг фазы в цепи переменного тока?
24. Когда наступает резонанс напряжений в RLC-цепи?
25. Определите коэффициент мощности цепи переменного тока.
26. Какие преимущества обеспечивает трехфазная система питания?
27. Что представляет собой четырехпроводная система электроснабжения?
28. По какой причине применяется нулевой провод в трехфазных сетях?
29. Какие факторы влияют на мощность трехфазной цепи?
30. Покажите разницу между симметричной и несимметричной нагрузкой.
31. Какие бывают виды погрешностей измерений?
32. Классифицируйте электроизмерительные приборы.

33. Какие устройства используются для расширения диапазона измерений?
34. Опишите принципы работы прибора для измерения сопротивления.
35. Зачем нужны косвенные методы измерения сопротивления?
36. Объясните роль индукционного механизма в приборах.
37. Опишите принцип работы электродинамического измерительного механизма.
38. Что такое калибровка измерительного оборудования?
39. Чем отличается прямое измерение от сравнительного метода?
40. Рассчитайте общую погрешность комбинированного измерения.
41. В чём заключается основной принцип работы трансформатора?
42. Что называют номинальными параметрами трансформатора?
43. Для чего служат автотрансформаторы?
44. Какие потери возникают в работе трансформатора?
45. Объясните работу трёхфазного трансформатора.
46. Как выбрать подходящий тип трансформатора для конкретной цели?
47. Какие особенности имеют измерительные трансформаторы?
48. Какие ограничения накладывает сердечник трансформатора?
49. За счёт чего достигается высокий КПД современных трансформаторов?
50. Приведите классификацию трансформаторов по назначению.
51. Что такое электронно-дырочный переход ("р-п"-переход)?
52. Охарактеризуйте прямой и обратный режимы работы "р-п"-перехода.
53. Какова структура полупроводникового диода?
54. Перечислите основные области применения полупроводниковых диодов.
55. В чём различие между биполярными и полевыми транзисторами?
56. Какие схемы включения характерны для биполярных транзисторов?
57. Какие физические процессы происходят внутри биполярного транзистора?
58. Назовите статические параметры биполярного транзистора.
59. Как устроены полевые транзисторы?
60. В чём заключаются различия между различными видами тиристоров?
61. Нарисуйте схему простейшего однофазного выпрямителя.
62. Какие фильтры используют для сглаживания пульсаций выходного напряжения выпрямителя?
63. Чем различаются LC- и RC-генераторы?
64. Объясните структуру и принцип работы импульсного генератора.
65. Что такое мультивибратор?
66. Назовите основные части стабилизатора напряжения.
67. Как работает трехфазный выпрямитель?
68. Объясните термин "температурный дрейф" применительно к электронной аппаратуре.
69. Какие показатели характеризуют качество стабилизации напряжения?
70. Каково назначение сглаживающих фильтров в источниках питания?
71. Какую основную функцию выполняют электронные усилители?
72. Перечислите основные параметры усилителей низких частот.
73. Что означает отрицательная обратная связь в усилителе?
74. Что такое амплитудно-частотная характеристика усилителя?
75. Объясните влияние температуры на стабильность работы усилителя.
76. Как организована схема однотактного усилителя на биполярном транзисторе?
77. Для чего применяют каскады усиления?
78. Какие требования предъявляются к качеству усилителей звуковых частот?
79. Чем определяется верхняя граница полосы пропускания усилителя?

80. Что такое перегрузочная способность усилителя?
81. Опишите структуру колебательного контура.
82. В чем разница между LC- и RC-генераторами?
83. Для чего предназначены генераторы импульсов?
84. Как работают электронные мультиметры?
85. Назовите виды цифровых измерительных приборов.
86. Объясните, зачем нужен электронный осциллограф?
87. Что представляют собой аналоговые стрелочные вольтметры?
88. В чем отличие цифрового вольтметра от аналогового?
89. Что такое широкополосный генератор?
90. Объясните принцип действия генератора линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН).

4. УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Требования к минимальному материально-техническому обеспечению

Реализация учебной дисциплины осуществляется в кабинете Электротехники:

Учебная аудитория 3-213: комплект учебной мебели на 24 посадочных места, справочник по электротехническим материалам, объемные модели металлической кристаллической решетки, стенды электрорадиоматериалов, цифровой измеритель, твердомеры для испытания твердости по методу Бринелля, Роквелла, электронный микроскоп, раздаточный материал, атласы микроструктур сплавов, комплект ГОСТов

Учебная аудитория 3-411: комплект учебной мебели на 32 посадочных места, доска аудиторная, мультимедийное оборудование (ноутбук, проектор), лабораторный комплект К-32 с комплектом сменных устройств (УС 11–УС-17), лабораторный стенд 87Л-01 с комплектом сменных панелей, низкочастотный генератор сигналов (ГЗ-120), осциллографы (С1-65), цифровые вольтметры (В7-38), низкочастотный частотомер комплекта БИС

Учебная аудитория 3-413: комплект учебной мебели на 32 посадочных мест, мультимедийное оборудование (телевизор), стеллажи для приборов и оборудования, шкафы для приборов и оборудования, амперметры, вольтметры, однофазные ваттметры, однофазные и трехфазные фазометры, магазины сопротивлений, осциллографы, реостаты, катушки индуктивности, автотрансформаторы, комплекты измерительных приборов (К-50), лабораторные стенды, кодоскоп

4.2. Информационное обеспечение обучения

Перечень рекомендуемых учебных изданий, Интернет-ресурсов, дополнительной литературы

Основная литература:

1. Кузовкин, В. А. Электротехника и электроника : учебник для среднего профессионального образования / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 431 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-07727-8. <https://www.biblio-online.ru/book/elektrotehnika-i-elektronika-433843>

2. Миленина, С. А. Электротехника : учебник и практикум для среднего профессионального образования / С. А. Миленина ; под редакцией Н. К. Миленина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 263 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-05793-5. <https://www.biblio-online.ru/book/elektrotehnika-438004>

Дополнительные источники:

3. Алиев И. И. Электротехника и электрооборудование: базовые основы : учебное пособие для среднего профессионального образования / И. И. Алиев. — 5-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2022. — 291 с.
4. Кузовкин В. А. Электротехника и электроника: учебник для среднего профессионального образования / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. — Москва: Издательство Юрайт, 2022. — 431 с.
5. Миленина, С. А. Электротехника, электроника и схемотехника: учебник и практикум для среднего профессионального образования / С. А. Миленина, Н. К. Миленин ; под редакцией Н. К. Миленина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2022. — 406 с.
6. Аполлонский С.М. Основы электротехники. Практикум: учебное пособие для СПО / С.М. Аполлонский. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 320 с. - ISBN 978-5-8114-6707-5. - Текст электронный // Лань: электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/151687> - Режим доступа: для авториз. пользователей.
7. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учебник для СПО / Г. И. Атабеков. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 592 с. - ISBN 978-5-8114-6802-7. - Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/152634> - Режим доступа: для авториз. пользователей.
8. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник для СПО / И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.Я. Фролов. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 736 с. - ISBN 978-5-8114-6756-3. - Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/152467> - Режим доступа: для авториз. пользователей.
9. Бычков Ю. А., Золотницкий В. М., Чернышев Э. П., Белянин А. Н. Основы теоретической электротехники: учебное пособие для СПО / - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 592 с. - ISBN 978-5-8114-6888-1. - Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/153656> - Режим доступа: для авториз. пользователей.
10. Потапов Л. А. Основы электротехники: учебное пособие для СПО / Л.А. Потапов. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 376 с. - ISBN 978-5-8114-6716-7. - Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/151696> - Режим доступа: для авториз. пользователей.

5. КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Контроль и оценка результатов освоения учебной дисциплины осуществляется преподавателем в процессе проведения практических занятий, тестирования, а также выполнения обучающимися индивидуальных заданий, проектов, исследований.

Общая/профессиональная компетенция	Результаты обучения	Формы и методы контроля и оценки результатов обучения
ОК.01 Выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам	Умения: - распознавать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте, анализировать и выделять её составные части - определять этапы решения задачи, составлять план действия, реализовывать составленный план, определять необходимые ресурсы - выявлять и эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы - владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах - оценивать результат и последствия своих действий (самостоятельно или с помощью наставника) Знания: - актуальный профессиональный и социальный контекст, в котором приходится работать и жить - структура плана для решения задач, алгоритмы выполнения работ в профессиональной и смежных областях - основные источники информации и ресурсы для решения задач и/или проблем в профессиональном и/или социальном контексте - методы работы в профессиональной и смежных сферах - порядок оценки результатов решения задач профессиональной деятельности	Фронтальный опрос Практические занятия Контрольная работа по разделам Зачет
ОК.02 Использовать современные средства поиска, анализа и интерпретации информации и информационные технологии для выполнения задач профессиональной деятельности	Умения: - определять задачи для поиска информации, планировать процесс поиска, выбирать необходимые источники информации - выделять наиболее значимое в перечне информации, структурировать получаемую информацию, оформлять результаты поиска - оценивать практическую значимость результатов поиска - применять средства информационных технологий для решения профессиональных задач - использовать современное программное обеспечение в профессиональной деятельности - использовать различные цифровые средства для решения профессиональных задач Знания: - номенклатура информационных источников, применяемых в профессиональной деятельности - приемы структурирования информации - формат оформления результатов поиска информации - современные средства и устройства информатизации, порядок их применения и - программное обеспечение в профессиональной деятельности, в том числе цифровые средства	Фронтальный опрос Практические занятия Контрольная работа по разделам Зачет
ОК 04. Эффективно взаимодействовать и работать в коллективе и команде;	Умения: - организовывать работу коллектива и команды - взаимодействовать с коллегами, руководством, клиентами в ходе профессиональной деятельности Знания: - психологические основы деятельности коллектива - психологические особенности личности	Фронтальный опрос Практические занятия Контрольная работа по разделам Зачет
ОК 05 Осуществлять устную и письменную коммуникацию на государственном языке Российской Федерации с учетом особенностей социального и культурного контекста	Умения: - грамотно излагать свои мысли и оформлять документы по профессиональной тематике на государственном языке - проявлять толерантность в рабочем коллективе Знания: - правила оформления документов - правила построения устных сообщений	Фронтальный опрос Практические занятия Контрольная работа по разделам Зачет
	Умения:	Фронтальный опрос

ОК 09 Пользоваться профессиональной документацией на государственном и иностранном языках.	– понимать общий смысл четко произнесенных высказываний на известные темы (профессиональные и бытовые), понимать тексты на базовые профессиональные темы – участвовать в диалогах на знакомые общие и профессиональные темы – строить простые высказывания о себе и о своей профессиональной деятельности – кратко обосновывать и объяснять свои действия (текущие и планируемые) – писать простые связные сообщения на знакомые или интересные профессиональные темы Знания: - правила построения простых и сложных предложений на профессиональные темы - основные общеупотребительные глаголы (бытовая и профессиональная лексика) - лексический минимум, относящийся к описанию предметов, средств и процессов профессиональной деятельности - особенности произношения - правила чтения текстов профессиональной направленности	Практические занятия Зачет Контрольная работа по разделам
ПК 1.2 Рассчитывать нормы и регистрировать расход материально-технических, энергетических ресурсов для осуществления технологических процессов судостроения.	Умения: – Использовать программное обеспечение для выполнения расчетов – Производить расчет экономической эффективности на основе проектируемых технологических процессов в судостроении Знания: - Правила организации технологической подготовки и управления технологической подготовкой производства, установленные ЕСТПП - Основы технологии судостроительного производства	Фронтальный опрос Практические занятия Контрольная работа по разделам Зачет

6. ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ В РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ

Дополнения и изменения в рабочей программе за ____/____ учебный год

В рабочую программу по дисциплине «Электроника и электротехника» для специальности 26.02.02 «Судостроение» вносятся следующие дополнения и изменения:

Дополнения и изменения внес _____
(должность, Ф.И.О., подпись)

Рабочая программа пересмотрена и одобрена на заседании педагогического совета протокол № _____ от « _____ » _____ 20__ г.

Зам. директора по УМР _____
(подпись)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАМЧАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»)**

КОЛЛЕДЖ

УТВЕРЖДАЮ
Директор колледжа
О.В. Жижикина

«29» 01 2026 г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

«Электроника и электротехника»

специальность:
26.02.02 «Судостроение»

Петропавловск-Камчатский
2026

1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования

Компетенции	Планируемые результаты	Критерии оценивания результатов обучения			
		неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	отлично
ОК.01 Выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам	Умения: распознавать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте, анализировать и выделять её составные части; определять этапы решения задачи, составлять план действия, реализовывать составленный план, определять необходимые ресурсы; выявлять и эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы; владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах; оценивать результат и последствия своих действий (самостоятельно или с помощью наставника)	Отсутствие умений выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам, эффективно искать информацию и оценивать результат и последствия своих действий.	Фрагментарные, неполные умения выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам, эффективно искать информацию и оценивать результат и последствия своих действий.	Небольшие пробелы в умении выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам, эффективно искать информацию и оценивать результат и последствия своих действий.	Сформированное умение выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам, эффективно искать информацию и оценивать результат и последствия своих действий.
	Знания: актуальный профессиональный и социальный контекст, в котором приходится работать и жить; структура плана для решения задач, алгоритмы выполнения работ в профессиональной и смежных областях; основные источники информации и ресурсы для решения задач и/или проблем в профессиональном и/или социальном контексте; методы работы в профессиональной и смежных сферах; порядок оценки результатов решения задач профессиональной деятельности.	Отсутствие знаний об основных источниках и ресурсах информации, о методах работы в профессиональной сфере и порядке оценки результатов решения задач профессиональной деятельности.	Несистемное использование знаний об основных источниках и ресурсах информации, о методах работы в профессиональной сфере и порядке оценки результатов решения задач профессиональной деятельности.	Небольшие пробелы в знаниях об основных источниках и ресурсах информации, о методах работы в профессиональной сфере и порядке оценки результатов решения задач профессиональной деятельности.	Сформирована система знаний об основных источниках и ресурсах информации, о методах работы в профессиональной сфере и порядке оценки результатов решения задач профессиональной деятельности.
ОК 02. Использовать современные средства поиска, анализа и интерпретации информации, и информационные технологии для выполнения задач профессиональной деятельности;	Умения: определять задачи для поиска информации; определять необходимые источники информации; планировать процесс поиска; структурировать получаемую информацию; выделять наиболее значимое в перечне информации; оценивать практическую значимость результатов поиска; оформлять результаты поиска, применять средства информационных технологий для решения профессиональных задач; использовать современное программное обеспечение; использовать различные цифровые средства для решения профессиональных задач.	Отсутствие умений использовать современные средства поиска правовой информации, интерпретации и систематизации правовой информации.	Фрагментарные, неполные умения использовать современные средства поиска правовой информации, интерпретации и систематизации правовой информации.	Небольшие пробелы в умении использовать современные средства поиска правовой информации, интерпретации и систематизации правовой информации.	Сформированное умение использовать современные средства поиска правовой информации, интерпретации и систематизации правовой информации.
	Знания: номенклатура информационных источников, применяемых в профессиональной деятельности; приемы структурирования информации; формат оформления результатов поиска информации, современные средства и устройства информатизации; порядок их применения и программное обеспечение в профессиональной деятельности в том числе с использованием цифровых средств.	Отсутствие знаний о правовых информационных источниках, способах структурирования информации и оформлении результатов поиска правовой информации.	Несистемное использование знаний о правовых информационных источниках, способах структурирования информации и оформлении результатов поиска правовой информации.	Небольшие пробелы в знаниях о правовых информационных источниках, способах структурирования информации и оформлении результатов поиска правовой информации.	Сформирована система знаний о правовых информационных источниках, способах структурирования информации и оформлении результатов поиска правовой информации.
ОК 04 Эффективно взаимодействовать и работать в коллективе и команде	Умения: организовывать работу коллектива и команды; взаимодействовать с коллегами, руководством, клиентами в ходе профессиональной деятельности.	Отсутствие умений организовывать работу коллектива и команды; взаимодействовать с коллегами, руководством, клиентами в ходе профессиональной деятельности.	Фрагментарные, неполные умения организовывать работу коллектива и команды; взаимодействовать с коллегами, руководством, клиентами в ходе профессиональной деятельности.	Небольшие пробелы в умении организовывать работу коллектива и команды; взаимодействовать с коллегами, руководством, клиентами в ходе профессиональной деятельности.	Сформированное умение организовывать работу коллектива и команды; взаимодействовать с коллегами, руководством, клиентами в ходе профессиональной деятельности.

	Знания: психологические основы деятельности коллектива; психологические особенности личности.	Отсутствие знаний о психологических основах деятельности коллектива и психологических особенностях личности.	Несистемное использование знаний о психологических основах деятельности коллектива и психологических особенностях личности.	Небольшие пробелы в знаниях о психологических основах деятельности коллектива и психологических особенностях личности.	Сформирована система знаний о психологических основах деятельности коллектива и психологических особенностях личности.
ОК.05 Осуществлять устную и письменную коммуникацию на государственном языке Российской Федерации с учетом особенностей социального и культурного контекста	Умения: грамотно излагать свои мысли и оформлять документы по профессиональной тематике на государственном языке; проявлять толерантность в рабочем коллективе	Отсутствие умений грамотно излагать свои мысли и оформлять документы по профессиональной тематике на государственном языке	Фрагментарные, неполные умения грамотно излагать свои мысли и оформлять документы по профессиональной тематике на государственном языке	Небольшие пробелы в умении грамотно излагать свои мысли и оформлять документы по профессиональной тематике на государственном языке	Сформированное умение грамотно излагать свои мысли и оформлять документы по профессиональной тематике на государственном языке
	Знания: правила оформления документов; правила построения устных сообщений.	Отсутствие знаний о правилах оформления документов; правилах построения устных сообщений.	Несистемное использование знаний о правилах оформления документов; правилах построения устных сообщений.	Небольшие пробелы в знаниях о правилах оформления документов; правилах построения устных сообщений.	Сформирована система знаний о правилах оформления документов; правилах построения устных сообщений.
ОК.09 Пользоваться профессиональной документацией на государственном и иностранном языках.	Умения: понимать общий смысл четко произнесенных высказываний на известные темы (профессиональные и бытовые), понимать тексты на базовые профессиональные темы: участвовать в диалогах на знакомые общие и профессиональные темы; строить простые высказывания о себе и о своей профессиональной деятельности; кратко обосновывать и объяснять свои действия (текущие и планируемые); писать простые связные сообщения на знакомые или интересующие профессиональные темы	Отсутствие умений понимать общий смысл четко произнесенных высказываний на известные темы (профессиональные и бытовые), понимать тексты на базовые профессиональные темы.	Фрагментарные, неполные умения понимать общий смысл четко произнесенных высказываний на известные темы (профессиональные и бытовые), понимать тексты на базовые профессиональные темы	Небольшие пробелы в умении понимать общий смысл четко произнесенных высказываний на известные темы (профессиональные и бытовые), понимать тексты на базовые профессиональные темы	Сформированное умение понимать общий смысл четко произнесенных высказываний на известные темы (профессиональные и бытовые), понимать тексты на базовые профессиональные темы
	Знания: правила построения простых и сложных предложений на профессиональные темы; основные общеупотребительные глаголы (бытовая и профессиональная лексика); лексический минимум, относящийся к описанию предметов, средств и процессов профессиональной деятельности; особенности произношения и правила чтения текстов профессиональной направленности	Отсутствие знаний о правилах построения простых и сложных предложений на профессиональные темы	Несистемное использование знаний о правилах построения простых и сложных предложений на профессиональные темы	Небольшие пробелы в знаниях о правилах построения простых и сложных предложений на профессиональные темы	Сформирована система знаний о правилах построения простых и сложных предложений на профессиональные темы
ПК 1.2 Рассчитывать нормы и регистрировать расход материально-технических, энергетических ресурсов для осуществления технологических процессов судостроения.	Умения: использовать программное обеспечение для выполнения расчетов; производить расчет экономической эффективности на основе проектируемых технологических процессов в судостроении	Отсутствие умений производить расчет экономической эффективности на основе проектируемых технологических процессов в судостроении	Фрагментарные, неполные умения производить расчет экономической эффективности на основе проектируемых технологических процессов в судостроении	Небольшие пробелы в умении производить расчет экономической эффективности на основе проектируемых технологических процессов в судостроении	Сформированное умение производить расчет экономической эффективности на основе проектируемых технологических процессов в судостроении
	Знания: правила организации технологической подготовки и управления технологической подготовкой производства, установленные ЕСТПП; основы технологии судостроительного производства	Отсутствие знаний о правилах организации технологической подготовки и управления технологической подготовкой производства	Несистемное использование знаний о правилах организации технологической подготовки и управления технологической подготовкой производства	Небольшие пробелы в знаниях о правилах организации технологической подготовки и управления технологической подготовкой производства	Сформирована система знаний о правилах организации технологической подготовки и управления технологической подготовкой производства

2. Уровень и критерии освоения компетенции, а также показатели и критерии оценки её сформированности

Уровень освоения	Критерии освоения	Показатели и критерии оценки сформированности компетенции
Продвину- тый	<i>Компетенции сформированы</i> Демонстрируется высокий уровень самостоятельности, высокая адаптивность практического навыка	Теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено на «отлично». Обучаемый демонстрирует способность к полной самостоятельности (допускаются консультации с преподавателем по сопутствующим вопросам) в выборе способа решения неизвестных или нестандартных заданий в рамках учебной дисциплины с использованием знаний, умений и навыков, полученных как в ходе освоения данной учебной дисциплины, так и смежных дисциплин.
Базовый	<i>Компетенции сформированы.</i> Демонстрируется достаточный уровень самостоятельности устойчивого практического навыка	Теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальной оценкой, некоторые виды заданий выполнены с несущественными ошибками. Качество выполнения заданий оценено преимущественно на «хорошо». Способность обучающегося продемонстрировать самостоятельное применение знаний, умений и навыков при решении заданий, аналогичных тем, которые представлял преподаватель при потенциальном формировании компетенции, подтверждает наличие сформированной компетенции, причем на более высоком уровне.
Пороговый	<i>Компетенции сформированы.</i> Демонстрируется недостаточный уровень самостоятельности практического навыка	Теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки. Качество выполнения заданий оценено преимущественно на «удовлетворительно». Если обучаемый демонстрирует самостоятельность в применении знаний, умений и навыков к решению учебных заданий в полном соответствии с образцом, данным преподавателем, по заданиям, решение которых было показано преподавателем, следует считать, что компетенция сформирована, но ее уровень недостаточно высок.
Низкий	<i>Компетенции не сформированы</i> Демонстрируется отсутствие или фрагментарное наличие самостоятельности и практического навыка	Теоретическое содержание курса не освоено, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом не сформированы, выполненные учебные задания содержат грубые ошибки. Неспособность обучающегося самостоятельно продемонстрировать наличие знаний при решении заданий, которые были представлены преподавателем вместе с образцом их решения, отсутствие самостоятельности в применении умения к использованию методов освоения учебной дисциплины и неспособность самостоятельно проявить навык повторения решения поставленной задачи по стандартному образцу свидетельствуют об отсутствии сформированной компетенции.

3. Описание шкал оценивания

Оценка	Результаты
Фронтальный опрос	
Отлично	Ответы на поставленные вопросы излагаются четко, логично, последователь-но и не требуют дополнительных пояснений, дела-ются обоснованные выводы, демонстрируются глубокие знания базовых нормативных и правовых актов, соблюдаются нормы ли-тературной речи
Хорошо	Ответы на поставленные вопросы излагаются систематизировано и последовательно, материал излагается уверенно, демонстриру-ется умение анализировать материал, однако не все выводы носят аргументированный и доказательный характер, соблюдаются нормы литературной речи, обучающийся демонстрирует хороший уровень освоения материала.
Удовлетворительно	Допускаются нарушения в последовательности изложения ответов на поставленные вопросы, демонстрируются поверхностные знания вопроса, имеются затруднения с выводами, допускаются нарушения норм литературной речи.
Неудовлетворительно	Материал излагается непоследовательно, сбивчиво, не представляет определенной системы знаний по дисциплине, имеются за-метные нарушения норм литературной речи, обучающийся допускает существенные ошибки в ответах на вопросы, не ориентиру-ется в понятийном аппарате.
Практическое занятие	
Отлично	Выставляется обучающемуся, чей результат анализа ситуации оказался наиболее всесторонним, чье решение или расчет оказался наиболее продуманным, логичным и предусматривающим большее количество альтернативных вариантов решений;
Хорошо	Выставляется обучающемуся, использовавшему методику или инструмент анализа с незначительными нарушениями, чья работа имеет незначительные погрешности
Удовлетворительно	Выставляется каждому обучающемуся, чья работа имеет нарушения, но в целом задание выполнено, анализ проведен поверх-ностно, в том числе с нарушением методики его проведения
Неудовлетворительно	Выставляется каждому обучающемуся, если работа выполнена с нарушением методики его выполнения, результаты не обосно-ваны, не сделаны выводы, выводы сделаны с грубыми нарушениями и не соответствует поставленной задаче.
Зачет	
Зачтено	выставляется обучающемуся, который усвоил предусмотренный программный материал; правильно, с применением примеров, показал систематизированные знания по темам дисциплины, способен связать теорию с практикой, тему вопроса с другими темами данного курса, других изучаемых дисциплин.
Не зачтено	Выставляется в следующих случаях: 1. Обучающийся не справился с заданием, не может ответить на вопросы, предложенные (поставленные) преподавателем, не об-ладает целостным представлением об изучаемой теме и ее взаимосвязях. 2. Ответ на вопрос полностью отсутствует. 3. Отказ от ответа.
Контрольная работа	

Отлично	Выставляется, если обучающийся показывает всесторонние и глубокие знания программного материала; последовательно и четко отвечает на вопросы; уверенно ориентируется в проблемных ситуациях; демонстрирует способность применять теоретические знания для анализа практических ситуаций, делать правильные выводы, проявляет творческие способности в понимании, изложении и использовании пройденного материала; подтверждает полное освоение компетенций, предусмотренных программой.
Хорошо	Выставляется, если обучающийся показывает полное знание программного материала; дает полные ответы на теоретические вопросы, допуская некоторые неточности; правильно применяет теоретические положения к оценке практических ситуаций; демонстрирует хороший уровень освоения материала и в целом подтверждает освоение компетенций, предусмотренных программой
Удовлетворительно	Выставляется, если обучающийся показывает знание основного материала в объеме, необходимом для предстоящей профессиональной деятельности; при ответе на вопросы не допускает грубых ошибок, но испытывает затруднения в последовательности их изложения; не в полной мере демонстрирует способность применять теоретические знания для анализа практических ситуаций, подтверждает освоение компетенций, предусмотренных программой на минимально допустимом уровне
Неудовлетворительно	Выставляется, если обучающийся имеет существенные пробелы в знаниях основного учебного материала по разделу; не способен аргументировано и последовательно его излагать, допускает грубые ошибки в ответах, неправильно отвечает на задаваемые преподавателем вопросы или затрудняется с ответом; не подтверждает освоение компетенций, предусмотренных программой.

4. Типовые задания, характеризующие этапы формирования компетенций

4.1 Фронтальный опрос

Фронтальный опрос является одним из наиболее эффективных методов формирования и диагностики компетенций студентов. Этот метод представляет собой коллективную форму взаимодействия между преподавателем и группой учащихся, в ходе которой каждому учащемуся задаются короткие вопросы, направленные на выявление уровня освоения пройденного материала.

Перечень примерных вопросов:

Раздел 1. Электротехника

Тема 1.1. Электрические цепи постоянного тока

1. Перечислите пассивные и активные элементы электрической цепи. Какие у них параметры и характеристики?
2. Как связаны законы Ома и Кирхгофа при расчете сложных электрических цепей?
3. Опишите алгоритм расчета простой электрической цепи постоянного тока.
4. В каком порядке осуществляется расчет электрических цепей методом узловых потенциалов?
5. Как вычисляется баланс мощностей в электрической цепи постоянного тока?

Тема 1.2. Электромагнетизм

1. Что такое магнитная проницаемость? В чем её физическая сущность?
2. Запишите закон электромагнитной индукции Фарадея и поясните его.
3. Что такое гистерезис и почему он важен при изучении свойств ферромагнетиков?
4. Какие явления лежат в основе принципа работы электромагнита?
5. Как рассчитать энергию магнитного поля в простейших случаях?

Тема 1.3. Электрические цепи переменного тока

1. Дайте определение активной, реактивной и полной мощности в цепях переменного тока.
2. Какие компоненты входят в состав треугольника напряжений и треугольника сопротивлений?
3. Объясните, что такое резонанс напряжений и резонанс токов в RLC-цепи.
4. Опишите схему трехфазной сети с четырьмя проводами («звезда»).
5. Как правильно выбирать конфигурацию подключения нагрузок в трехфазных системах?

Тема 1.4. Электрические измерения

1. Как классифицируются электроизмерительные приборы?
2. В чем суть расширяющих пределы измерения шунтов и добавочных сопротивлений?
3. Какие методы измерения электрического сопротивления вы знаете?
4. Как определить класс точности электроизмерительного прибора?
5. В чем заключается принцип работы электродинамических приборов?

Тема 1.5. Трансформаторы

1. Объясните принцип действия однофазного трансформатора.
2. Что обозначают номинальные параметры трансформатора?
3. Какова конструкция автотрансформатора и его отличия от обычного трансформатора?
4. Какие причины вызывают потери энергии в трансформаторе?
5. Какие виды трансформаторов чаще всего встречаются в промышленности?

Тема 1.6. Электрические машины переменного и постоянного тока

1. Назовите основные классы электрических машин переменного тока и охарактеризуйте их предназначение.
2. Объясните конструкцию и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя.
3. В чем состоит явление скольжения в асинхронных машинах?
4. Перечислите основные рабочие процессы, происходящие в машине постоянного тока.
5. Чем характеризуется рабочий процесс синхронного генератора?

Тема 1.7. Основы электропривода

1. Какие основные составляющие включают в себя электропривод?
2. Назовите важнейшие механические характеристики нагрузочных устройств.
3. Как производится расчёт необходимой мощности привода при кратковременных режимах работы?
4. Какие аппараты используются для управления электроприводом?
5. Объясните порядок выбора типа двигателя для конкретного технологического процесса.

Тема 1.8. Электрические и магнитные устройства автоматики

1. Опишите структуру системы автоматического контроля и регулирования.
2. Какие функции выполняют измерительные преобразователи?
3. Приведите примеры методов преобразования неэлектрических величин в электрические сигналы.
4. Что такое параметрические преобразователи и как они функционируют?
5. Опишите устройство и принцип работы генераторных преобразователей.

Раздел 2. Электроника

Тема 2.1. Физические основы электроники. Электронные приборы

1. Что такое электронно-дырочный переход ("p-n") и какими свойствами он обладает?
2. Опишите работу полупроводникового диода и перечислите его основные параметры.
3. Объясните принцип функционирования биполярного транзистора.
4. Чем принципиально отличается полевой транзистор от биполярного?
5. Что такое тиристор и каковы его основные разновидности?

Тема 2.2. Электронные выпрямители и стабилизаторы

1. Как устроен и функционирует однофазный выпрямитель?
2. Какие меры принимаются для снижения пульсации выходного напряжения выпрямителя?
3. Какие существуют типы стабилизаторов напряжения?
4. Опишите принцип работы LC-генератора.
5. В чем заключается задача фильтра в электронном источнике питания?

Тема 2.3. Электронные усилители

1. Объясните, как действует усилитель низкой частоты на биполярном транзисторе.
2. Что такое обратная связь в усилителях и какую роль она играет?
3. Назовите основные критерии оценки качества усилителей.
4. В чем состоят принципиальные различия между одноктактными и двухтактными усилителями?
5. Какие проблемы вызывает температурная нестабильность усилителей и как их решают?

Тема 2.4. Электронные генераторы и измерительные приборы

1. Поясните устройство и функционирование колебательных контуров.

2. Какими характеристиками обладают генераторы синусоидальных колебаний типов LC и RC?
3. Что такое мультивибратор и где он применяется?
4. Объясните назначение и принцип работы электронного осциллографа.
5. Перечислите основные узлы цифровой измерительной техники.

4.2 Практические занятия

Практические занятия являются важным методом формирования профессиональных компетенций у студентов, поскольку они позволяют закрепить теоретические знания, развить навыки самостоятельного принятия решений и повысить готовность к решению реальных проблем в профессиональной деятельности.

Практическое занятие № 1

Тема: «Расчёт работы и мощности источников и потребителей электрической энергии. Способы соединения. Методы расчёта электрических цепей»

Задание: решить задачи.

Практическое занятие №2

Тема: «Расчёт цепей, содержащих конденсаторы при различных способах соединения».

Задание: решить задачи.

Практическое занятие №3

Тема: «Расчёт основных характеристик магнитного поля. Расчёт ЭДС индукции и магнитных цепей».

Задания: решить задачи.

Практическое занятие №4

Тема: «Расчёт RC-, RL-,RLC-цепей переменного тока при последовательном и параллельном соединении. Резонанса токов и напряжении. Расчёт коэффициента мощности «cos φ»».

Задание: решить задачи.

Практическое занятие №5

Тема: «Электрические измерения и приборы. Расчёт погрешностей измерений».

Задание: решить задачи.

4.3 Лабораторные работы

Лабораторная работа №1

Тема: «Исследование рабочих характеристик трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором».

Задание:

1. Ознакомиться с устройством и основными техническими характеристиками исследуемого двигателя.
2. Освоить методики экспериментального исследования характеристик асинхронного двигателя.
3. Экспериментально снять рабочие характеристики двигателя: скорость вращения, развиваемый момент, потребляемую мощность и КПД при изменении нагрузки.
4. Проанализировать зависимости механических и энергетических показателей двигателя от нагрузки.

Лабораторная работа №2

Тема: «Реверсивный пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором».

Задание:

1. Ознакомиться с устройством и схемой управления реверсивным пуском асинхронного двигателя.
2. Исследовать процессы, происходящие в двигателе при запуске в разных направлениях вращения.
3. Получить опыт сборки и настройки реверсивной схемы управления двигателем.
4. Произвести измерения основных параметров двигателя при реверсе и сопоставить их с исходными значениями.

Лабораторная работа №3

Тема: «Исследование входных и выходных вольтамперных характеристик биполярного транзистора. Проверка проводимости диода. Изучение работы биполярного транзистора, тиристора».

Задание:

1. Изучить устройство и принцип работы биполярного транзистора и тиристора.
2. Построить и исследовать входные и выходные вольтамперные характеристики биполярного транзистора.
3. Проверить проводимость полупроводникового диода.
4. Научиться собирать и настраивать испытательные схемы.
5. Овладеть навыком обработки и интерпретации экспериментальных данных.

Лабораторная работа №4

Тема: «Исследование входного напряжения однополупериодного и двухполупериодного выпрямителя с помощью осциллографа».

Задание:

1. Исследовать форму входного напряжения на входе выпрямителей.
2. Изучить работу и характерные особенности однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.
3. Исследовать формы выходного напряжения выпрямленных сигналов.
4. Сделать сравнение реального и теоретически предсказанного выхода выпрямителей.
5. Оценить эффективность выпрямления и степень фильтрации пульсаций.

4.4 Контрольная работа

Контрольная работа – эффективный инструмент проверки знаний обучающихся по отдельному разделу учебной дисциплины. Она помогает преподавателю объективно оценить уровень усвоения материала, выявить пробелы в знаниях и своевременно скорректировать учебный процесс.

Примерные варианты контрольной работы по разделам:

Раздел 1

Вариант №1

Теоретические вопросы:

1. Что такое активная и реактивная составляющая импеданса? В чем их различие?
2. Почему при включении катушки индуктивности в цепь переменного тока появляется сдвиг фаз между напряжением и током?
3. Объясните принцип действия трансформатора и перечислите основные режимы его работы.

4. В чем заключается обратимость электрических машин?
5. Как выбираются номиналы защитных аппаратов в цепях переменного тока?

Практические задачи:

6. **Задача №1:** Найдите общее сопротивление цепи, состоящей из последовательно включённых резисторов 10 Ом, 20 Ом и параллельно подключённого резистора 30 Ом.
7. **Задача №2:** Катушка индуктивности включена в цепь переменного тока частотой 50 Гц. Ток в цепи равен 2 А, напряжение на катушке составляет 100 В. Вычислите индуктивность катушки.
8. **Задача №3:** Трёхфазный асинхронный двигатель потребляет мощность 10 кВт при напряжении 380 В и коэффициенте мощности $\cos \varphi = 0,8$. Определите силу тока, протекающего через каждую фазу двигателя.
9. **Задача №4:** Одна лампа мощностью 60 Вт и две лампы мощностью 40 Вт каждая включены параллельно в сеть с напряжением 220 В. Найдите общий ток потребления ламп.

Вариант №2

Теоретические вопросы:

1. Объясните принцип действия законов Ома и Кирхгофа в применении к простым и сложным электрическим цепям.
2. Какой физический смысл заложен в параметрах «собственная индуктивность» и «взаимная индуктивность»?
3. Что такое синхронный двигатель и каковы его основные конструктивные особенности?
4. Каковы основные признаки перегрузки трансформатора и каким образом можно предотвратить перегрев?
5. Охарактеризуйте три способа соединения обмоток трёхфазного генератора («звезда», «треугольник»).

Практические задачи:

6. **Задача №1:** Три резистора сопротивлением 5 Ом, 10 Ом и 15 Ом соединены параллельно. Определите общее сопротивление цепи.
7. **Задача №2:** Конденсатор ёмкостью 10 мкФ включен в цепь переменного тока частотой 50 Гц. Через конденсатор протекает ток силой 2 А. Найдите напряжение на конденсаторе.
8. **Задача №3:** Трёхфазный двигатель с симметричной нагрузкой потребляет мощность 15 кВт при напряжении 380 В и коэффициенте мощности $\cos \varphi = 0,85$. Найти силу тока в одной фазе.
9. **Задача №4:** Лампы мощностью 60 Вт, 100 Вт и 40 Вт подключены последовательно к сети с напряжением 220 В. Определите падение напряжения на каждой лампе.

Раздел 2

Вариант №1

Теоретические вопросы:

1. Что такое электронно-дырочный переход и каковы его основные свойства?
2. Какие виды полупроводниковых диодов существуют и где они применяются?
3. Объясните, как работает биполярный транзистор и приведите его классификацию.
4. Опишите принцип действия полевых транзисторов и укажите их основное преимущество перед биполярными транзисторами.
5. В чем заключается работа выпрямителя и какие существуют типы выпрямителей?

Практические задачи:

6. **Задача №1:** Диод имеет пороговое напряжение открытия 0,7 В. Определите величину прямого падения напряжения на диоде при прямом смещении, если приложено напряжение 1,5 В.

7. **Задача №2:** Транзистор включен по схеме с общим эмиттером. Его коэффициент передачи тока $\beta = 100$. Базовый ток составляет 0,1 мА. Определите ток коллектора.
8. **Задача №3:** Предложите схему простого стабилизатора напряжения на основе стабилитрона. Опишите её работу.
9. **Задача №4:** Рассчитайте коэффициент усиления по напряжению для операционного усилителя, работающего в режиме повторителя напряжения.
10. **Задача №5:** Проверьте работоспособность транзистора NPN-транзистора с использованием мультиметра. Последовательно объясните шаги проверки.

Вариант №2

Теоретические вопросы:

Что такое собственный и примесный полупроводник? В чем их отличие?

Перечислите основные классификации полупроводниковых диодов и дайте характеристику каждому типу.

Объясните принцип работы биполярного транзистора и укажите его основные области применения.

Какие существуют типы тиристоров и как они работают?

Зачем нужны стабилизаторы напряжения и как они реализуются на практике?

Практические задачи:

Задача №1: Рассмотрим кремниевый диод с прямым падением напряжения 0,7 В. Определите ток через диод, если к нему приложено напряжение 1,2 В и внутреннее сопротивление диода равно 10 Ом.

Задача №2: Полевой транзистор имеет крутизну 10 мА/В и сопротивление сток-затвор 1 МОм. При подаче управляющего напряжения 3 В определите выходной ток транзистора.

Задача №3: Предложите простую схему однополупериодного выпрямителя и вычислите эффективное значение выходного напряжения, если известно, что амплитуда входного напряжения равна 10 В.

Задача №4: Рассчитайте усиление по напряжению для дифференциального усилителя, если известны значения коэффициентов передачи: $A_1 = +10$ и $A_2 = -10$.

Задача №5: Разработайте последовательность действий для проверки работоспособности биполярного PNP-транзистора с помощью мультиметра.

4.5 Зачет

Примерные вопросы к дифференцированному зачету:

1. Что такое пассивный элемент электрической цепи?
2. Чем отличаются последовательное и параллельное соединение электроприемников?
3. Дайте определение закона Ома.
4. Объясните закон Кирхгофа для замкнутых контуров.
5. Какие существуют способы соединений резисторов?
6. Приведите формулу баланса мощностей в электрической цепи.
7. Для чего используется потенциальная диаграмма?
8. Как рассчитывается простая электрическая цепь постоянного тока?
9. Опишите метод эквивалентного генератора.
10. Как определить напряжение узла в сложной схеме методом узловых потенциалов?
11. Какой физический смысл имеет магнитная проницаемость?
12. Запишите закон электромагнитной индукции Фарадея.
13. Что называется гистерезисом?
14. От чего зависит величина ЭДС взаимной индукции?

15. Как рассчитываются неразветвленные магнитные цепи?
16. Что является источником электромагнитных сил?
17. Где применяются электромагниты?
18. Обоснуйте энергетику магнитного поля.
19. Укажите отличительную особенность ферромагнетиков.
20. Объясните, почему возникает эффект гистерезиса?
21. Дайте понятие амплитуды и периода синусоидального сигнала.
22. Почему векторные диаграммы удобны для анализа цепей переменного тока?
23. Как влияет активное сопротивление на сдвиг фазы в цепи переменного тока?
24. Когда наступает резонанс напряжений в RLC-цепи?
25. Определите коэффициент мощности цепи переменного тока.
26. Какие преимущества обеспечивает трехфазная система питания?
27. Что представляет собой четырехпроводная система электроснабжения?
28. По какой причине применяется нулевой провод в трехфазных сетях?
29. Какие факторы влияют на мощность трехфазной цепи?
30. Покажите разницу между симметричной и несимметричной нагрузкой.
31. Какие бывают виды погрешностей измерений?
32. Классифицируйте электроизмерительные приборы.
33. Какие устройства используются для расширения диапазона измерений?
34. Опишите принципы работы прибора для измерения сопротивления.
35. Зачем нужны косвенные методы измерения сопротивления?
36. Объясните роль индукционного механизма в приборах.
37. Опишите принцип работы электродинамического измерительного механизма.
38. Что такое калибровка измерительного оборудования?
39. Чем отличается прямое измерение от сравнительного метода?
40. Рассчитайте общую погрешность комбинированного измерения.
41. В чём заключается основной принцип работы трансформатора?
42. Что называют номинальными параметрами трансформатора?
43. Для чего служат автотрансформаторы?
44. Какие потери возникают в работе трансформатора?
45. Объясните работу трёхфазного трансформатора.
46. Как выбрать подходящий тип трансформатора для конкретной цели?
47. Какие особенности имеют измерительные трансформаторы?
48. Какие ограничения накладывает сердечник трансформатора?
49. За счёт чего достигается высокий КПД современных трансформаторов?
50. Приведите классификацию трансформаторов по назначению.
51. Что такое электронно-дырочный переход ("р-п"-переход)?
52. Охарактеризуйте прямой и обратный режимы работы "р-п"-перехода.
53. Какова структура полупроводникового диода?
54. Перечислите основные области применения полупроводниковых диодов.
55. В чем различие между биполярными и полевыми транзисторами?
56. Какие схемы включения характерны для биполярных транзисторов?
57. Какие физические процессы происходят внутри биполярного транзистора?
58. Назовите статические параметры биполярного транзистора.
59. Как устроены полевые транзисторы?
60. В чем заключаются различия между различными видами тиристоров?
61. Нарисуйте схему простейшего однофазного выпрямителя.
62. Какие фильтры используют для сглаживания пульсаций выходного напряжения выпрямителя?
63. Чем различаются LC- и RC-генераторы?
64. Объясните структуру и принцип работы импульсного генератора.

65. Что такое мультивибратор?
66. Назовите основные части стабилизатора напряжения.
67. Как работает трехфазный выпрямитель?
68. Объясните термин "температурный дрейф" применительно к электронной аппаратуре.
69. Какие показатели характеризуют качество стабилизации напряжения?
70. Каково назначение сглаживающих фильтров в источниках питания?
71. Какую основную функцию выполняют электронные усилители?
72. Перечислите основные параметры усилителей низких частот.
73. Что означает отрицательная обратная связь в усилителе?
74. Что такое амплитудно-частотная характеристика усилителя?
75. Объясните влияние температуры на стабильность работы усилителя.
76. Как организована схема однотактного усилителя на биполярном транзисторе?
77. Для чего применяют каскады усиления?
78. Какие требования предъявляются к качеству усилителей звуковых частот?
79. Чем определяется верхняя граница полосы пропускания усилителя?
80. Что такое перегрузочная способность усилителя?
81. Опишите структуру колебательного контура.
82. В чем разница между LC- и RC-генераторами?
83. Для чего предназначены генераторы импульсов?
84. Как работают электронные мультиметры?
85. Назовите виды цифровых измерительных приборов.
86. Объясните, зачем нужен электронный осциллограф?
87. Что представляют собой аналоговые стрелочные вольтметры?
88. В чем отличие цифрового вольтметра от аналогового?
89. Что такое широкополосный генератор?
90. Объясните принцип действия генератора линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН).

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАМЧАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»)

Колледж

Д.В. Ронжин

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические указания к изучению курса, выполнению практических и лабораторных работ для студентов специальности 26.02.02 «Судостроение»
очная и заочная форма обучения*

Петропавловск-Камчатский
2026 г.

Дмитрий Владимирович Ронжин

Электротехника и электроника. Методические указания к изучению курса, выполнению практических и лабораторных работ для студентов специальности 26.02.02 «Судостроение» – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2026. – 129 с.

Методические указания к изучению курса, выполнению практических и лабораторных работ для студентов специальности 26.02.02 «Судостроение» составлены в соответствии с требованиями к освоению основной образовательной программы подготовки выпускников по специальности 26.02.02 «Судостроение» федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования.

© КамчатГТУ, 2026
© Ронжин Д.В., 2026

СОДЕРЖАНИЕ

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КУРСА.....	4
2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСА.....	4
3. СОДЕРЖАНИЕ КУРСА.....	7
3.1 Содержание лекционных занятий	7
3.2 Практические занятия.....	11
3.3 Лабораторные работы	115
3.4 Контрольная работа	122
4. ВОПРОСЫ ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ.....	125
5. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБУЧЕНИЯ.....	128

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КУРСА

ОП.03 «Электротехника и электроника»

Дисциплина предназначена для изучения студентами специальности 26.02.02 «Судостроение» и входит в общепрофессиональный учебный цикл.

ОП.03 «Электротехника и электроника» предназначена для формирования у будущих инженеров-судостроителей фундаментальных знаний и профессиональных компетенций в области электричества и электроники, необходимых для проектирования, монтажа, обслуживания и ремонта судов и морских сооружений.

Учебный процесс сочетает лекции, лабораторные и практические занятия, нацеленные на развитие навыков самостоятельной работы, анализа и интерпретации информации. Курс предназначен для освоения общих и профессиональных концепций. Промежуточная аттестация проходит в форме зачета.

2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСА

Цель изучения дисциплины «Электроника и электротехника» для студентов судостроительных специальностей заключается в формировании прочных теоретических знаний и практических навыков, необходимых для понимания принципов работы электронных устройств и электрических машин, применяемых в конструкции судов и морской технике. Освоив данную дисциплину, студенты смогут грамотно проектировать, эксплуатировать и обслуживать электрооборудование морских объектов, обеспечивая безопасность плавания и надежность функционирования судовых систем.

Основные задачи:

- Изучение основных законов электричества и магнетизма, позволяющих анализировать работу простых электрических цепей и сложных схем управления электронными устройствами.
- Формирование базовых понятий о работе полупроводников, диодов, транзисторов и интегральных микросхем, используемых в современной электронной аппаратуре.
- Ознакомление с принципами построения электронных приборов и преобразователей энергии, обеспечивающих управление различными системами судна (электропривод, автоматизация, навигационные системы).
- Обучение основам теории электрических машин постоянного и переменного тока, электродвигателей и генераторов, широко применяемых в судовом оборудовании.
- Развитие умения проводить расчетные исследования простейших электронных схем и выбирать компоненты для конкретных целей.
- Овладение методами измерения и диагностики неисправностей в электрической цепи и устройствах электроники, применяя контрольно-измерительные приборы.

– Подготовка будущих инженеров-судостроителей к грамотному подбору электрооборудования, соответствующего условиям эксплуатации на судах различного назначения.

– Получение опыта проектирования элементов автоматизированных систем контроля и управления техническими процессами на борту судна.

В результате изучения учебной дисциплины обучающийся должен:

уметь:

– распознавать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте, анализировать и выделять её составные части;

– определять этапы решения задачи, составлять план действия, реализовывать составленный план, определять необходимые ресурсы;

– выявлять и эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы;

– владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах;

– оценивать результат и последствия своих действий (самостоятельно или с помощью наставника);

– определять задачи для поиска информации, планировать процесс поиска, выбирать необходимые источники информации;

– выделять наиболее значимое в перечне информации, структурировать получаемую информацию, оформлять результаты поиска;

– оценивать практическую значимость результатов поиска;

– применять средства информационных технологий для решения профессиональных задач;

– использовать современное программное обеспечение в профессиональной деятельности;

– использовать различные цифровые средства для решения профессиональных задач;

– организовывать работу коллектива и команды;

– взаимодействовать с коллегами, руководством, клиентами в ходе профессиональной деятельности;

– грамотно излагать свои мысли и оформлять документы по профессиональной тематике на государственном языке;

– проявлять толерантность в рабочем коллективе;

– понимать общий смысл четко произнесенных высказываний на известные темы (профессиональные и бытовые), понимать тексты на базовые профессиональные темы;

– участвовать в диалогах на знакомые общие и профессиональные темы;

– строить простые высказывания о себе и о своей профессиональной деятельности

– кратко обосновывать и объяснять свои действия (текущие и планируемые);

- писать простые связные сообщения на знакомые или интересующие профессиональные темы;
- использовать программное обеспечение для выполнения расчетов;
- производить расчет экономической эффективности на основе проектируемых технологических процессов в судостроении.

знать:

- актуальный профессиональный и социальный контекст, в котором приходится работать и жить;
 - структура плана для решения задач, алгоритмы выполнения работ в профессиональной и смежных областях;
 - основные источники информации и ресурсы для решения задач и/или проблем в профессиональном и/или социальном контексте;
 - методы работы в профессиональной и смежных сферах;
 - порядок оценки результатов решения задач профессиональной деятельности;
 - номенклатура информационных источников, применяемых в профессиональной деятельности;
 - приемы структурирования информации;
 - формат оформления результатов поиска информации;
 - современные средства и устройства информатизации, порядок их применения и программное обеспечение в профессиональной деятельности, в том числе цифровые средства;
 - психологические основы деятельности коллектива;
 - психологические особенности личности;
 - правила оформления документов;
 - правила построения устных сообщений;
 - правила построения простых и сложных предложений на профессиональные темы;
 - основные общеупотребительные глаголы (бытовая и профессиональная лексика);
 - лексический минимум, относящийся к описанию предметов, средств и процессов профессиональной деятельности;
 - особенности произношения
 - правила чтения текстов профессиональной направленности
 - Правила организации технологической подготовки и управления технологической подготовкой производства, установленные ЕСТПП
- Основы технологии судостроительного производства.

3. СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

3.1 Содержание лекционных занятий

Раздел 1. Электротехника

Тема 1.1. Электрические цепи постоянного тока

Элементы электрической цепи, их параметры и характеристики. Пассивные и активные элементы электрической цепи. Элементы схемы электрической цепи: ветвь, узел, контур. Последовательное, параллельное и смешанное соединения электроприемников. Электродвижущая сила (ЭДС). Электрическая проводимость. Резистор. Соединение резисторов.

Сборка электрических схем. Источники напряжения и тока, их свойства, характеристики и схемы замещения. Законы Ома и Кирхгофа. Простые и сложные цепи.

Режимы работы цепей, баланс мощностей. Потенциальная диаграмма. Основы расчета электрической цепи постоянного тока. Расчет простых электрических цепей.

Расчет электрических цепей произвольной конфигурации методами: контурных токов, узловых потенциалов, двух узлов (узлового напряжения), метод суперпозиции (наложения) и метод эквивалентного генератора.

Тема 1.2 Электромагнетизм

Основные понятия. Растяжение и сжатие. Основные механические характеристики материалов. Расчеты на прочность при растяжении и сжатии. Срез и сжатие. Кручение. Прямой поперечный изгиб. Определение перемещений при изгибе. Теория предельных напряженных состояний. Понятие о сопротивлении усталости. Прочность при динамических нагрузках. Устойчивость при осевом нагружении стержня. Раскрытие статической неопределимости систем. Расчеты на прочность при растяжении и сжатии. Испытания образца на растяжение. Расчеты на прочность при срезе и смятии. Прямой поперечный изгиб (решение примеров).

Тема 1.3 Электрические цепи переменного тока

Понятие о генераторах переменного тока. Получение синусоидальной ЭДС. Общая характеристика цепей переменного тока. Амплитуда, период, частота, фаза, начальная фаза синусоидального тока. Мгновенное, амплитудное, действующее и среднее значение ЭДС, напряжения, тока.

Изображение синусоидальных величин с помощью временных и векторных диаграмм.

Электрическая цепь: с активным сопротивлением; с катушкой индуктивности (идеальной); с емкостью. Векторная диаграмма.

Разность фаз напряжения и тока. Неразветвленные электрические RC и RL-цепи переменного тока. Треугольники напряжений, сопротивлений, мощностей.

Коэффициент мощности. Баланс мощностей. Неразветвленная электрическая RLC-цепь переменного тока, резонанс напряжений и условия его возникновения. Разветвленная электрическая RLC-цепь переменного тока, резонанс токов и условия его возникновения.

Расчет электрической цепи, содержащей источник синусоидальной ЭДС. Многофазные системы. Получение трехфазной ЭДС. Схемы соединения обмоток генератора и фаз потребителя «звездой». Симметричная и несимметричная нагрузка. Четырех- и трехпроводные системы.

Фазные, линейные напряжения и токи, соотношения между ними. Векторные диаграммы. Мощность трехфазной цепи. Напряжение смещения нейтрали при соединении звездой. Роль нулевого провода.

Топографическая диаграмма. Схемы соединения обмоток генератора фаз потребителя «треугольником». Мощность цепи при различных соединениях нагрузки.

Тема 1.4. Электрические измерения

Основные понятия измерения. Погрешности измерений.

Классификация электроизмерительных приборов. Измерение тока и напряжения. Приборы и схемы для измерения электрического напряжения.

Расширение пределов измерения амперметров и вольтметров. Измерение мощности. Электродинамический измерительный механизм.

Измерение мощности в цепях постоянного и переменного токов.

Измерение электрического сопротивления, измерительные механизмы. Индукционный измерительный механизм.

Измерение электрической энергии. Косвенные методы измерения сопротивления, методы и приборы сравнения для измерения сопротивления.

Тема 1.5. Трансформаторы

Назначение, принцип действия устройство однофазного трансформатора. Режимы работы трансформатора.

Номинальные параметры трансформатора: мощность, напряжение токи обмоток. Потери энергии и КПД трансформатора.

Типы трансформаторов и их применение: однофазные, трехфазные, многообмоточные. Исследование режимов работы трансформаторов.

Автотрансформаторы. Измерительные трансформаторы

Тема 1.6. Электрические машины переменного и постоянного тока

Назначение машин переменного тока и их классификация. Получение вращающегося магнитного поля в трехфазных электродвигателях и генераторах.

Устройство электрической машины переменного тока: статор и его обмотка, ротор и его обмотка. Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя.

Частота вращения магнитного поля статора и частота вращения ротора. Вращающий момент асинхронного двигателя. Скольжение. Устройство и принцип действия асинхронного двигателя.

Физические процессы, проходящие в асинхронном двигателе. Применение асинхронных двигателей.

Устройство машин постоянного тока. Физические процессы, проходящие в синхронном двигателе. Пуск в ход асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.

Рабочий процесс асинхронного двигателя и его механическая характеристика. Регулирование частоты вращения ротора.

Однофазный и двухфазный асинхронный электродвигатели.

Применение электрических машин постоянного тока.

Синхронные машины и область их применения. Назначение машин постоянного тока и их классификация. Устройство и принцип действия машин постоянного тока: магнитная цепь, коллектор, обмотка якоря

Рабочий процесс машины постоянного тока: ЭДС обмотки якоря, реакция якоря, коммутация. Обратимость машин.

Синхронный генератор. Синхронный двигатель. Генераторы постоянного тока, двигатели постоянного тока, общие сведения.

Пуск в ход, регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока. Потери энергии и КПД машин постоянного тока.

Тема 1.7. Основы электропривода

Понятие об электроприводе. Уравнение движения электропривода. Механические характеристики нагрузочных устройств.

Расчет мощности и выбор двигателя при продолжительном, кратковременном и повторно -кратковременном режимах. Аппаратура для управления электроприводом.

Тема 1.8. Электрические и магнитные устройства автоматики

Структура системы автоматического контроля, управления и регулирования. Измерительные преобразователи.

Измерение неэлектрических величин электрическими методами.

Параметрические преобразователи: резистивные, индуктивные, емкостные. Генераторные преобразователи.

Раздел 2. Электроника

Тема 2.1 Физические основы электроники. Электронные приборы

Электропроводимость полупроводников. Собственная и примесная проводимость. Электронно-дырочный переход и его свойства. Прямое и обратное включение "р-п" перехода.

Полупроводниковые диоды: классификация, свойства, маркировка, область применения.

Полупроводниковые транзисторы: классификация, принцип действия, назначение, область применения, маркировка.

Биполярные транзисторы. Физические процессы в биполярном транзисторе. Схемы включения биполярных транзисторов: общая база, общий эмиттер, общий коллектор.

Вольтамперные характеристики, параметры схем. Статические параметры, динамический режим работы, температурные и частотные свойства биполярных транзисторов

Полевые транзисторы. классификация, принцип действия, назначение, область применения.

Тиристоры. классификация, принцип действия, назначение, область применения.

Тема 2.2 Электронные выпрямители и стабилизаторы

Основные сведения, структурная схема электронного выпрямителя. Однофазные и трехфазные выпрямители. Сглаживающие фильтры.

Основные сведения, структурная схема электронного стабилизатора. Стабилизаторы напряжения. Стабилизаторы тока.

Изучение логических интегральных микросхем, проверка логических схем, как элементов системы электрооборудования машин.

Тема 2.3 Электронные усилители

Схемы усилителей электрических сигналов. Основные технические характеристики электронных усилителей. Принцип работы усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе.

Обратная связь в усилителях. Многокаскадные усилители. Температурная стабилизация режима работы усилителя.

Исследование амплитудной и амплитудно-частотной характеристик однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе

Исследование амплитудной и амплитудно-частотной характеристик однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе.

Тема 2.4 Электронные генераторы и измерительные приборы

Колебательный контур. Структурная схема электронного генератора. Генераторы синусоидальных колебаний; генераторы LC-типа, генераторы RC-типа. Импульсные генераторы: мультивибратор, триггер.

Генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН - генератор). Электронные стрелочные и цифровые вольтметры. Электронный осциллограф.

3.2 Практические занятия

Практическое занятие № 1

Тема: «Расчёт работы и мощности источников и потребителей электрической энергии. Способы соединения. Методы расчёта электрических цепей»

Теоретический материал:

Направленное движение электрических зарядов по проводнику носит название электрического тока.

За направление электрического тока следовало бы считать направление движения свободных электронов по металлическому проводнику, однако за направление электрического тока условно принято считать направление движения положительных зарядов в проводнике. Эта условность сложилась исторически и в настоящее время сохранила свою силу в электротехнике.

Для поддержания в проводнике непрерывного электрического тока необходимо обеспечить постоянную разность потенциалов, или напряжение.

Практически электрический ток получают от специальных источников: гальванических элементов, аккумуляторов, генераторов.

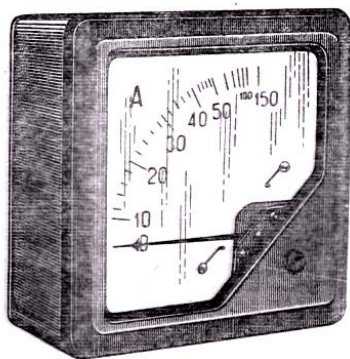
Если через поперечное сечение проводника проходит q кулонов электричества за t секунд, то количество электричества, прошедшего через поперечное сечение проводника в течение одной секунды, называется величиной тока и обозначается буквой I :

$$I = \frac{q}{t}$$

Единицей величины тока является 1 ампер, определяемый как количество электричества в 1 кулон, прошедшего через поперечное сечение проводника в 1 секунду, т. е.

$$1 \text{ ампер} = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ секунда}}$$

Ток в цепи измеряется электрическим прибором - амперметром.



Амперметр нужно включать так, чтобы через него прошел полный ток цепи. Для этого надо разорвать цепь в каком-либо месте и образовавшиеся концы подключить к зажимам амперметра, т. е. включить прибор последовательно.

Амперметр, измеряющий тысячные доли ампера, называется миллиамперметром, миллионные доли ампера - микроамперметром.

Принцип действия и устройство амперметров и других электроизмерительных приборов будут рассмотрены далее.

Ток, не изменяющийся по величине и по направлению, называется постоянным током.

Постоянный ток дают гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы постоянного тока.

Отношение величины тока к площади поперечного сечения проводника S называется плотностью тока и обозначается греческой буквой δ (дельта):

$$\delta = \frac{I}{S}$$

Так как обычно площадь сечения проводников дается в квадратных миллиметрах, то плотность тока измеряется в А/мм².

Сопротивление и проводимость проводников. зависимость сопротивления проводников от физических условий

При замыкании электрической цепи, на зажимах которой имеется разность потенциалов, возникает электрический ток. Свободные электроны под влиянием электрических сил поля перемещаются вдоль проводника. В своем движении свободные электроны наталкиваются на атомы проводника и отдают им запас своей кинетической энергии.

Таким образом, электроны, проходя по проводнику, встречают сопротивление своему движению. При прохождении электрического тока через проводник последний нагревается.

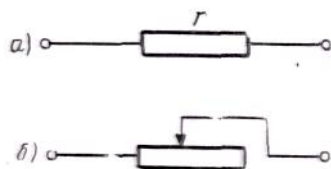


Рис.1 Условные обозначения постоянного (а) и переменного (б) электрического сопротивления

Электрическим сопротивлением проводника (оно обозначается латинской буквой r) обусловлено явление преобразования электрической энергии в тепловую при прохождении электрического тока по проводнику. На схемах

электрическое сопротивление обозначается так, как показано на рис. 1.

За единицу сопротивления принят 1 Ом. Ом часто обозначается греческой прописной буквой Ω (омега). Поэтому, вместо того чтобы писать: «Сопротивление проводника равно 15 Ом», можно написать просто: $r = 15 \Omega$.

1000 ом называется 1 килоом (1 кОм, или 1 к Ω).

1 000 000 ом называется 1 мегаом (1 МОм, или 1 М Ω).

Прибор, обладающий переменным электрическим сопротивлением и служащий для изменения тока в цепи, называется реостатом. На схемах реостаты обозначаются, как показано на рис. 1. Как правило, реостат изготавливается из проволоки того или иного сопротивления, намотанной на изолирующем основании. Ползунок или рычаг реостата ставится в определенное положение, в результате чего в цепь вводится нужное сопротивление.

Электрическое сопротивление проводника зависит от длины проводника, поперечного сечения проводника, материала проводника, температуры проводника.

При сравнении сопротивлений проводников из различных материалов необходимо брать для каждого образца определенную длину и сечение. Тогда мы сможем судить о том, какой материал лучше или хуже проводит электрический ток.

Сопротивление (в омах) проводника длиной 1 м, сечением 1 мм² называется удельным сопротивлением и обозначается греческой буквой ρ (ро).

Сопротивление проводника можно определить по формуле

$$r = \frac{\rho l}{S}$$

Где

r - сопротивление проводника, ом;

ρ - удельное сопротивление проводника;

l - длина проводника, м;

S - сечение проводника, мм².

Из указанной формулы получаем размерность для удельного сопротивления

$$\rho = \frac{rS}{l} \quad \text{Ом} = \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

В табл. 1 даны удельные сопротивления некоторых проводников.

Таб-
лица 1

Удельные сопротивления различных проводников

Материал проводника	Удельное сопротивление
	$\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$
Серебро.....	0,016
Медь.....	0,0175
Алюминий.....	0,03
Вольфрам.....	0,05
Железо.....	0,13
Свинец.....	0,2
Никелин (сплав меди, никеля и цинка)...	0,42
Манганин (сплав меди, никеля и марганца)	0,43
Константан (сплав меди, никеля и алюминия)	0,5
Ртуть.....	0,94
Нихром (сплав никеля, хрома, железа и марганца).....	1,1

Пример 1. Определить сопротивление 200 м железной проволоки сечением

5 мм²:

$$r = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,13 \times 200}{5} = 5,2 \text{ кОм}$$

Пример 2. Вычислить сопротивление 2 км алюминиевой проволоки сечением 2,5 мм²:

$$\rho = \frac{rS}{l} = \frac{0,03 \times 2000}{2,5} = 24 \text{ Ом}$$

Из формулы сопротивления легко можно определить длину, удельное сопротивление и сечение проводника.

Пример 3. Для радиоприемника необходимо намотать сопротивление в 30 Ом из никелиновой проволоки сечением 0,21 мм². Определить необходимую длину проволоки:

$$l = \frac{rS}{\rho} = \frac{30 \times 0,21}{0,42} = 15 \text{ м}$$

Пример 4. Определить сечение нихромовой проволоки длиной 20 м, если сопротивление ее равно 25 ом:

$$l = \frac{rS}{\rho} = \frac{1,1 \times 20}{25} = 0,88 \text{ мм}^2$$

Пример 5. Проволока сечением 0,5 мм² и длиной 40 м имеет сопротивление 16 ом. Определить материал проволоки.

Материал проводника характеризует его удельное сопротивление

$$\rho = \frac{rS}{l} = \frac{1,6 \times 0,5}{40} = 0,2$$

По таблице удельных сопротивлений находим, что таким сопротивлением обладает свинец.

Ранее было указано, что сопротивление проводников зависит от температуры. У некоторых металлов при нагревании на 100° сопротивление увеличивается на 40-50%. Имеются сплавы, которые незначительно меняют свое сопротивление с нагревом. Некоторые специальные сплавы практически не меняют сопротивления при изменении температуры. Сопротивление металлических проводников при повышении температуры увеличивается, сопротивление электролитов (жидких проводников), угля и некоторых твердых веществ, наоборот, уменьшается.

Способность металлов менять свое сопротивление с изменением температуры используется для устройства термометров сопротивления. Такой термометр представляет собой платиновую проволоку, намотанную на слюдяной каркас. Помещая термометр, например, в печь и измеряя сопротивление платиновой проволоки до и после нагрева, можно определить температуру в печи.

Изменение сопротивления проводника при его нагревании, приходящееся на 1 ом первоначального сопротивления и на 1° температуры, называется температурным коэффициентом сопротивления и обозначается буквой α (альфа).

Если при температуре t_0 сопротивление проводника равно r_0 , а при температуре t равно r_t , то температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha = \frac{r_t - r_0}{r_0(t - t_0)}$$

Примечание. Расчет по этой формуле можно производить лишь в определенном интервале температур (примерно до 200° С).

В табл. 2 приводим значения температурного коэффициента сопротивления α для некоторых металлов.

Таблица 2 Значения температурного коэффициента для некоторых металлов

Металл	α	Металл	α
Серебро.....	0,0035	Ртуть	0,0090
Медь.....	0,0040	Никелин.....	0,0003
Железо	0,0066	Константен.....	0,000005
Вольфрам.....	0,0045	Нихром.....	0,00016
Платина.....	0,0032	Манганин.....	0,00005

Из формулы для температурного коэффициента сопротивления определим r_t :

$$r_t = r_0[1 \pm \alpha(t-t_0)].$$

Пример 6. Определить сопротивление железной проволоки, нагретой до 200° , если сопротивление ее при 0° было 100 Ом:

$$r_t = r_0 [1 + \alpha (t - t_0)] = 100 (1 + 0,0066 \cdot 200) = 232 \text{ Ом.}$$

Пример 7. Термометр сопротивления, изготовленный из платиновой проволоки, в помещении с температурой 15° имел сопротивление 20 Ом. Термометр поместили в печь и через некоторое время было измерено его сопротивление. Оно оказалось равным 29,6 Ом. Определить температуру печи:

$$t = \frac{r_t - r_0}{r_0 \alpha} + t_0 = \frac{29,6 - 20}{20 \times 0,0032} + 15 = 165^\circ$$

Чем большим сопротивлением обладает проводник, тем меньшую он имеет проводимость, тем хуже он проводит электрический ток, и наоборот. Поэтому сопротивление и проводимость проводника являются обратными величинами.

Если сопротивление проводника обозначается буквой r , то проводимость определяется как $\frac{1}{r}$. Обычно проводимость обозначается буквой g .

Электрическая проводимость измеряется в $\frac{1}{\text{Ом}}$ - (или в сименсах).

Пример 8. Сопротивление проводника равно 20 Ом. Определить его проводимость.

Если $r = 20$ ом, то

$$g = \frac{1}{r} = \frac{1}{20} = 0,05 \frac{1}{\text{Ом}}$$

Пример 9. Проводимость проводника равна $0,1 \frac{1}{\text{Ом}}$. Определить его сопротивление.

$$\text{Если } g = 0,1 \frac{1}{\text{Ом}}, \text{ то } r = \frac{1}{0,1} = 10 \text{ Ом}$$

Закон Ома

Как показывают опыты, ток на участке цепи прямо пропорционален напряжению на этом участке и обратно пропорционален сопротивлению того же участка. Эта зависимость известна под названием закона Ома.

Если обозначим: I - ток в амперах, U - напряжение в вольтах, r - сопротивление в Омах, то закон Ома можно представить формулой

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

т. е. ток на данном участке цепи равен напряжению на этом участке, деленному на сопротивление того же участка.

Пример 10. Определить ток, который будет проходить по нити лампы накаливания, если нить имеет неизменное сопротивление 240 Ом, а лампа включена в сеть с напряжением 120 в:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120}{240} = 0,5 \text{ А}$$

Пользуясь формулой закона Ома, можно определить также напряжение и сопротивление цепи:

$$U = I r,$$

т. е. напряжение цепи равно произведению тока на сопротивление этой цепи, и

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

т. е. сопротивление цепи равно напряжению, деленному на ток. Произведение тока I , протекающего через какое-либо сопротивление, на величину этого сопротивления r называется падением напряжения на этом сопротивлении и обозначается буквой U :

$$U = I r.$$

Пример 11. Какое нужно напряжение, чтобы в цепи с сопротивлением 6 Ом протекал ток 20 А?

$$U = I r = 20 \cdot 6 = 120 \text{ В.}$$

Пример 12. По спирали электрической плитки протекает ток в 5 А. Плитка включена в сеть с напряжением 220 в. Определить сопротивление спирали электрической плитки:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} = 44 \text{ Ом}$$

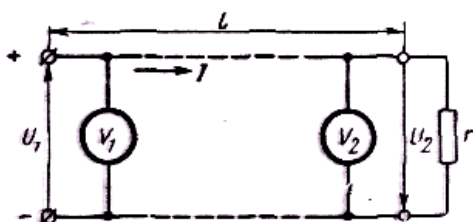


Рис.2 потеря напряжения в проводах

На рис. 2 приведена электрическая цепь, состоящая из источника электрической энергии, потребителя, имеющего сопротивление r , и длинных соединительных проводов, которые имеют сопротивление $r_{\text{л}}$ (сопротивление линии). При работе схемы, т. е. при прохождении по цепи электрического тока, показание вольтметра, включенного в начале линии U_1 ,

будет больше показания вольтметра, включенного в конце линии U_2 .

Такое уменьшение напряжения вдоль цепи по мере удаления от источника вызвано потерей напряжения в проводах ΔU :

$$\Delta U = U_1 - U_2$$

Потеря напряжения в линии происходит потому, что часть напряжения будет теряться в проводах линии. При этом потеря напряжения будет тем больше, чем больше ток линии и чем больше сопротивление проводов. Потеря напряжения равна току, протекающему по проводам линии, умноженному на сопротивление проводов:

$$U_1 - U_2 = \Delta U = 2I r = 2I \frac{\rho l}{S},$$

где U_1 - напряжение в начале линии, В;

U_2 - напряжение в конце линии, В;

I - ток линии, А;

ρ - удельное сопротивление проводов линии;

l - длина линии (в один конец), м; S - сечение проводов, мм².

Пример 13. От генератора, напряжение на зажимах которого 115 В, электроэнергия передается электродвигателю по проводам, сопротивление которых 0,1 Ом. Определить напряжение на зажимах двигателя, если он потребляет ток в 50 А.

Очевидно, что на зажимах двигателя напряжение будет меньше, чем на зажимах генератора, так как в линии будет потеря напряжения. По формуле

$$\Delta U = I r = 50 \cdot 0,1 = 5 \text{ В.}$$

Если в линии потеря напряжения равна 5 В, то напряжение у электродвигателя будет $115 - 5 = 110$ В.

Пример 14. Напряжение на зажимах генератора равно 240 В. Электроэнергия по линии из двух медных проводов длиной по 350 м, сечением 10 мм² передается к электродвигателю, потребляющему ток в 15 А. Требуется определить напряжение на зажимах двигателя.

Напряжение на зажимах двигателя будет меньше напряжения генератора на величину потери напряжения в линии.

Так как сопротивление r проводов неизвестно, определяем его по формуле

$$r = 2 \frac{\rho l}{S} = 2 \frac{0,0175 \times 350}{10} = 1,22 \text{ Ом}$$

Подставляя r в формулу, получим

$$\Delta U = I r = 15 \cdot 1,22 = 18,3 \text{ В.}$$

Следовательно, напряжение на зажимах двигателя будет $240 - 18,3 = 221,7$ В.

Пример 15. Определить поперечное сечение алюминиевых проводов, которое необходимо применить, чтобы передать электрическую энергию двигателю, работающему при напряжении в 120 В и токе в 20 А. Энергия к двигателю будет подаваться от генератора напряжением 127 В по линии длиной 150 м.

Находим допустимую потерю напряжения:

$$\Delta U = 127 - 120 = 7 \text{ В.}$$

Сопротивление проводов линии должно быть равно:

$$r = \frac{\Delta U}{I} = \frac{7}{20} = 0,35 \text{ Ом}$$

Из формулы

$$r = 2 \frac{\rho l}{s}$$

определяем сечение провода:

$$r = 2 \frac{\rho l}{s} = 2 \frac{0,0175 \times 300}{0,35} = 25,7 \text{ мм}^2$$

По справочнику выбираем имеющееся сечение 25 мм².

Если ту же линию выполнить медным проводом, то сечение его будет равно:

$$r = 2 \frac{\rho l}{s} = 2 \frac{0,0175 \times 300}{0,35} = 15 \text{ мм}^2$$

Выбираем сечение 16 мм².

Пример 16. Для устойчивого горения электрической дуги требуется ток 10 А при напряжении 40 В. Определить величину добавочного сопротивления, которое нужно включить последовательно с дуговой установкой, чтобы питать ее от сети с напряжением 120 В.

Падение напряжения в добавочном сопротивлении составит
120 - 40 = 80 В.

Зная падение напряжения в добавочном сопротивлении и ток, протекающий через него, можно по закону Ома для участка цепи определить величину этого сопротивления:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{80}{10} = 8 \text{ Ом}$$

При рассмотрении электрической цепи мы до сих пор не принимали в расчет того, что путь тока проходит не только по внешней части цепи, но также и по внутренней части цепи, т. е. внутри самого элемента, аккумулятора или другого источника энергии.

Электрический ток, проходя по внутренней части цепи, преодолевает ее внутреннее сопротивление и потому внутри источника также происходит падение напряжения.

Следовательно, электродвижущая сила (э. д. с.) источника электрической энергии идет на покрытие внутренних и внешних потерь напряжения в цепи.

Если E - электродвижущая сила в вольтах, I - ток в амперах, r - сопротивление внешней цепи в Омах, r_0 - сопротивление внутренней части цепи в Омах, ΔU_0 - внутренняя потеря напряжения и U - напряжение внешней цепи, то

$$E = \Delta U_0 + U = Ir_0 + Ir = I(r_0 + r),$$

$$I = \frac{E}{r_0 + r}$$

Это есть формула закона Ома для всей цепи. Словами она читается так: *ток в электрической цепи равен электродвижущей силе, деленной на сопротивление всей цепи (сумму внутреннего и внешнего сопротивлений).*

Пример 17. Электродвижущая сила E элемента равна 1,5 В, его внутреннее сопротивление $r_0 = 0,3$ Ом. Элемент замкнут на сопротивление $r = 2,7$ Ом. Определить ток в цепи:

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{1,5}{0,3 + 2,7} = 0,5 \text{ А}$$

Пример 18. Определить э. д. с. элемента E , замкнутого на сопротивление $r = 2$ Ом, если ток в цепи $I = 0,6$ А. Внутреннее сопротивление элемента $r_0 = 0,5$ Ом.

Вольтметр, включенный на зажимы элемента, покажет напряжение на них, равное напряжению сети или потере напряжения во внешней цепи:

$$U = I r = 0,6 \cdot 2 = 1,2 \text{ В.}$$

Следовательно, часть э. д. с. элемента идет на покрытие внутренней потери напряжения, а остальная часть - 1,2 В - отдается в сеть. Внутреннее падение напряжения

$$\Delta U_0 = I r_0 = 0,6 \cdot 0,5 = 0,3 \text{ В.}$$

Так как $E = \Delta U_0 + U$, то

$$E = 0,3 + 1,2 = 1,5 \text{ В.}$$

Тот же ответ можно получить, если воспользоваться формулой закона Ома для всей цепи

$$I = \frac{E}{r_0 + r}$$

откуда

$$E = I (r_0 + r) = 0,6 (0,5 + 2) = 1,5 \text{ В.}$$

При размыкании электрической цепи ток по ней проходить не будет. Ток не будет проходить также и внутри источника э. д. с. а следовательно, не будет и внутренней потери напряжения. Поэтому вольтметр при разомкнутой цепи покажет э. д. с. источника электрической энергии.

Таким образом, вольтметр, включенный на зажимы источника э. д. с., показывает:

при замкнутой электрической цепи - напряжение сети;

при разомкнутой электрической цепи - э. д. с. источника электрической энергии.

Пример 19. Электродвижущая сила элемента 1,8 В. Он замкнут на сопротивление $r = 2,7$ Ом. Ток в цепи равен 0,5 А. Определить внутреннее сопротивление r_0 элемента и внутреннее падение напряжения ΔU_0 :

$$r_0 + r = \frac{E}{I} = \frac{1,8}{0,5} = 3,6 \text{ Ом.}$$

Так как $r = 2,7$, то

$$r_0 = 3,6 - 2,7 = 0,9 \text{ Ом;}$$

$$\Delta U_0 = I r_0 = 0,5 \cdot 0,9 = 0,45 \text{ В.}$$

Соединение проводников между собой. первый закон Кирхгофа

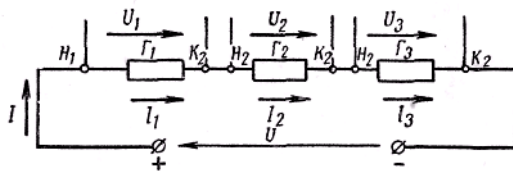


Рис.3 Последовательное соединение проводников

Отдельные проводники электрической цепи могут быть соединены между собой последовательно, параллельно и смешанно.

Если проводники соединены таким образом, что по ним проходит один и тот же ток, то такое соединение проводников называется последовательным (рис. 3).

Следовательно, ток на отдельных участках последовательной цепи имеет одинаковую величину:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

Сумма падений напряжений на отдельных участках равна напряжению всей цепи:

$$U = I_1 r_1 + I_2 r_2 + I_3 r_3 = I(r_1 + r_2 + r_3).$$

Напряжение цепи можно представить как

$$U = I r,$$

где r — общее сопротивление всей цепи. Следовательно,

$$I r = I(r_1 + r_2 + r_3)$$

Сокращая обе части равенства на I , получим

$$r = r_1 + r_2 + r_3$$

Общее сопротивление цепи, состоящей из нескольких последовательно соединенных сопротивлений, равно сумме этих сопротивлений.

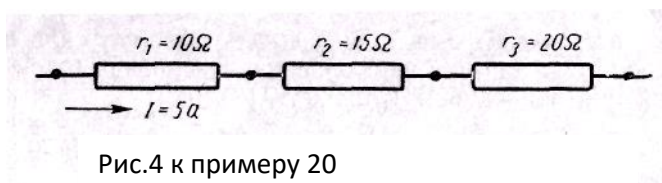


Рис.4 к примеру 20

Пример 20. Три сопротивления 10, 15 и 20 Ом соединены последовательно, как показано на рис. 4 Ток в цепи 5А. Определить падение напряжения на

каждом сопротивлении и общее напряжение цепи:

$$U_1 = I r_1 = 5 \cdot 10 = 50 \text{ В};$$

$$U_2 = I r_2 = 5 \cdot 15 = 75 \text{ В};$$

$$U_3 = I r_3 = 5 \cdot 20 = 100 \text{ В}.$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 50 + 75 + 100 = 225 \text{ В}.$$

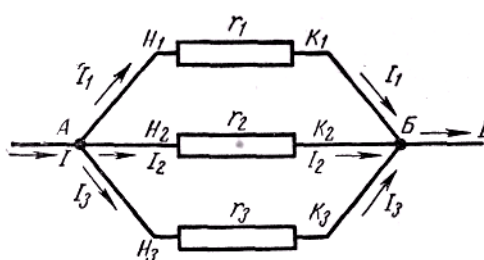


Рис.5 Параллельное соединение проводников

Если два или большее число проводников присоединены к двум узловым точкам, то такое соединение проводников называется **параллельным** (рис. 5). Напряжение на каждом из проводников равно напряжению U , приложенному к узловым точкам цепи А и В.

На рисунке видно, что при параллельном соединении проводников для прохождения тока имеется несколько путей. Ток, притекая к точке разветвления А, растекается далее по трем сопротивлениям и равен сумме токов, уходящих от этой точки:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Если токи, приходящие к точке разветвления, считать положительными, а уходящие - отрицательными, то для точки разветвления можно написать:

$$\sum_{\kappa=1}^{\kappa=0} I_{\kappa} = 0$$

т. е. алгебраическая сумма токов для любой узловой точки цепи всегда равна нулю. Это соотношение называется первым законом Кирхгофа.

Обычно при расчете электрических цепей направления токов в ветвях, присоединенных к какой-либо точке разветвления, неизвестны. Поэтому для возможности самой записи уравнения первого закона Кирхгофа нужно перед началом расчета цепи произвольно выбрать так называемые положительные направления токов во всех ее ветвях и обозначить их стрелками на схеме. Действительные направления токов определятся в результате расчета.

Пользуясь законом Ома, можно вывести формулу для подсчета общего сопротивления при параллельном соединении потребителей. Общий ток, приходящий к точке А, равен

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

Токи в каждой из ветвей имеют значения:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \quad I_2 = \frac{U}{R_2} \quad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

По первому закону Кирхгофа,

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

или

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

Вынося U в правой части равенства за скобки, получим

$$\frac{U}{R} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

Сокращая обе части равенства на U, получим формулу подсчета общей проводимости

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

или

$$g = g_1 + g_2 + g_3$$

Таким образом, при параллельном соединении увеличивается не сопротивление, а проводимость.

Пример 21. Определить общее сопротивление трех параллельно включенных сопротивлений, если $r_1 = 2$ ом, $r_2 = 3$ ом, $r_3 = 4$ ом:

$$g=g_1+g_2+g_3=\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\frac{1}{4}=\frac{6+4+3}{12}=\frac{13}{12} \frac{1}{\text{Ом}}$$

откуда

$$r = \frac{12}{13} = 0,92 \text{ Ом.}$$

Пример 22. Пять сопротивлений 20, 30, 15, 40 и 60 Ом включены параллельно в сеть. Определить общее сопротивление:

$$g=g_1+g_2+g_3+g_4+g_5=\frac{1}{20}+\frac{1}{30}+\frac{1}{15}+\frac{1}{40}+\frac{1}{60}=\frac{6+4+8+3+2}{120}=\frac{23}{120} \frac{1}{\text{Ом}}$$

откуда

$$r = \frac{120}{23} = 5,2 \text{ Ом.}$$

Следует заметить, что *общее сопротивление разветвленного участка цепи всегда меньше, чем самое меньшее сопротивление, входящее в разветвление.*

Если сопротивления, включенные параллельно, равны между собой, то общее сопротивление r цепи равно сопротивлению одной ветви r_1 , деленному на число ветвей n :

$$r = \frac{r_1}{n}$$

Пример 23. Определить общее сопротивление четырех параллельно включенных сопротивлений по 20 ом каждое:

$$r = \frac{r_1}{n} = \frac{20}{4} = 5 \text{ Ом}$$

Для проверки попробуем найти сопротивление разветвления по формуле

$$g=g_1+g_2+g_3+g_4=\frac{1}{20}+\frac{1}{20}+\frac{1}{20}+\frac{1}{20}=\frac{4}{20} \frac{1}{\text{Ом}}$$

$$r = \frac{r_1}{n} = \frac{20}{4} = 5 \text{ Ом}$$

Ответ получается тот же.

Пример 24. Пусть требуется определить токи в каждой ветви при параллельном соединении, изображенном на рис. 6, а.

Найдем общее сопротивление цепи:

$$g=g_1+g_2+g_3=\frac{1}{2}+\frac{1}{4}+\frac{1}{6}=\frac{6+3+2}{12}=\frac{11}{12} \frac{1}{\text{Ом}}$$

откуда

$$r = \frac{12}{11} = 1,09 \text{ Ом.}$$

Теперь все разветвление мы можем изобразить упрощенно как одно сопротивление (рис. 6, б).

Падение напряжения на участке между точками А и Б будет

$$U = I r = 22 \cdot 1,09 = 24 \text{ В.}$$

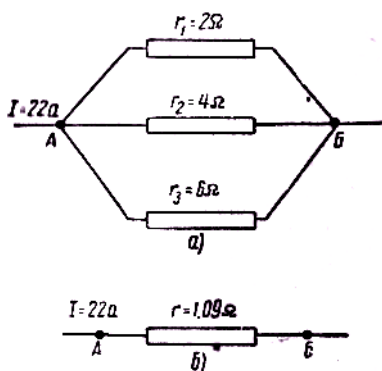


Рис 6.К примеру 24

Возвращаясь снова к рис. 28, а, видим, что все три сопротивления окажутся под напряжением 24 В, так как они включены между точками А и Б. Рассматривая первую ветвь разветвления с сопротивлением Γ , мы видим, что напряжение на этом участке 24 В, сопротивление участка 2 Ом. По закону Ома, ток на этом участке будет

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{24}{2} = 12 \text{ А}$$

Ток второй ветви

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{24}{4} = 6 \text{ А}$$

Ток третьей ветви

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{24}{6} = 4 \text{ А}$$

Проверим по первому закону Кирхгофа:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 12 + 6 + 4 = 22 \text{ А.}$$

Следовательно, задача решена верно.

Обратим внимание на то, как распределяются токи в ветвях нашего параллельного соединения:

первая ветвь: $R_1 = 2 \text{ Ом}$, $I_1 = 12 \text{ А}$;

вторая ветвь: $\Gamma_2 = 4 \text{ Ом}$, $I_2 = 6 \text{ А}$;

третья ветвь: $\Gamma_3 = 6 \text{ Ом}$, $I_3 = 4 \text{ А}$.

Как видим, сопротивление первой ветви в два раза меньше сопротивления второй ветви, а ток первой ветви в два раза больше тока второй ветви. Сопротивление третьей ветви в три раза больше сопротивления первой ветви, а ток третьей ветви в три раза меньше тока первой ветви. Отсюда можно сделать вывод, что *токи в ветвях при параллельном соединении распределяются обратно пропорционально сопротивлениям этих ветвей*. Таким образом, по ветви с большим сопротивлением потечет ток меньший, чем по ветви с малым сопротивлением.

Для двух параллельных ветвей проще пользоваться данной выше формулой. Общее сопротивление в этом случае можно подсчитать по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$$

или окончательно:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Если в электрической цепи имеются как последовательные, так и параллельные соединения отдельных про-

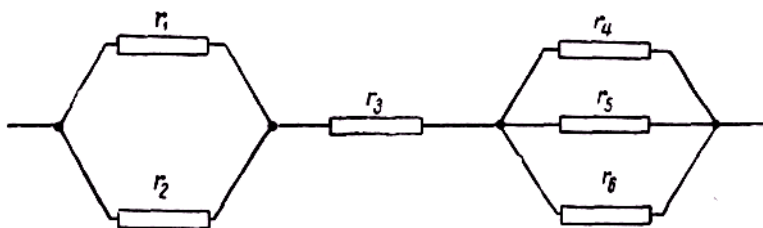


Рис. 7 Смешанное соединение проводников

водников, то мы имеем дело со смешанным соединением.

Пример 25. Определить общее сопротивление смешанного соединения, представленного на рис. 7, если

$r_1 = 2 \text{ Ом}$, $r_2 = 3 \text{ Ом}$, $r_3 = 5 \text{ Ом}$, $r_4 = 4 \text{ Ом}$, $r_5 = 8 \text{ Ом}$ и $r_6 = 6 \text{ Ом}$.

Находим общее сопротивление первого разветвления:

$$g_{1,2} = g_1 + g_2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} = \frac{3+2}{6} = \frac{5}{6} \text{ Ом}$$

откуда

$$r_{1,2} = \frac{6}{5} \text{ Ом} = 1.2 \text{ Ом}.$$

Общее сопротивление второго разветвления

$$G_{4,5,6} = g_4 + g_5 + g_6 = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{6} = \frac{6+4+3}{12} = \frac{13}{24} \text{ Ом},$$

Откуда:

$$r_{4,5,6} = \frac{24}{13} \text{ Ом} = 1.85 \text{ Ом}. \text{ Общее сопротивление цепи:}$$

$$r = r_{1,2} + r_3 + r_{4,5,6} = 1.2 + 5 + 1.85 = 8.05 \text{ ом}.$$

Работа и мощность электрического тока

К цепи, представленной на рис. 8, приложено постоянное напряжение U :

$$U = \varphi_A - \varphi_B.$$

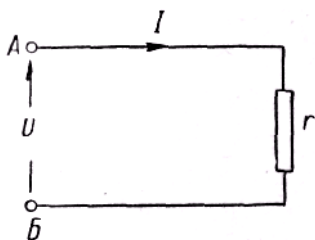


Рис.8 К выводу формулы работы и мощности электрического тока

За время t по цепи протекало количество электричества q . Силы электрического поля, действующего вдоль проводника, перенесли за это время заряд q из точки А в точку Б. Работа электрических сил поля, или, что то же, работа электрического тока, может быть подсчитана по формуле

$$U = q(\varphi_A - \varphi_B) = qU$$

Так как $q = It$, то окончательно получим

$$A = UIt,$$

где A - работа, Дж; I - ток, А; t - время, сек; U - напряжение, В. По закону Ома, $U = Ir$. Поэтому формулу работы можно написать и так:

$$A = I^2 Rt.$$

Работа, произведенная в единицу времени, называется мощностью и обозначается буквой P :

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

Из этой формулы имеем

$$A = Pt.$$

Единица мощности

$$\frac{1 \text{ Джоуль}}{1 \text{ секунду}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{ Вт}$$

- иначе называется ваттом (Вт). Подставляя в формулу мощности выражение для работы электрического тока, имеем:

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

$$P = UI \text{ Вт},$$

или

$$P = \frac{I^2 R t}{t} = I^2 R$$

$$P = I^2 R$$

Кроме Ватта, применяются более крупные единицы мощности:

$$100 \text{ Вт} = 1 \text{ гектоватт (гВт)};$$

$$1000 \text{ Вт} = 1 \text{ киловатт (кВт)};$$

$$1\,000\,000 \text{ Вт} = 1 \text{ мегаватт (МВт)}.$$

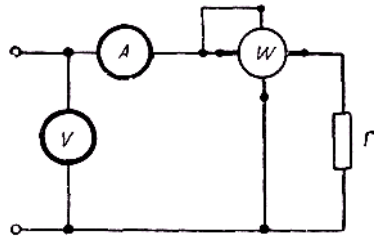


Рис. 9. Схема включения ваттметра

Электрическая мощность измеряется ваттметром. Ваттметр имеет две обмотки: последовательную и параллельную. Схема включения ваттметра показана на рис. 9.

Из формулы $P = IU$ видно, что мощность можно определить, умножив ток на напряжение. Поэтому для определения мощности, потребляемой сетью, следует

показание амперметра умножить на показание вольтметра.

Так, например, мощность, потребляемая в цепи, при показании амперметра 3 А и вольтметра 120 В будет

$$P = IU = 3 \cdot 120 = 360 \text{ Вт}.$$

Для практических измерений электрической работы (энергии) джоуль является слишком мелкой единицей.

Если время t подставлять не в секундах, а в часах, то получим более крупные единицы электрической энергии:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт сек};$$

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ ватт} \cdot \text{секунд} = 3600 \text{ Дж}; 100 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 1 \text{ гектоватт} \cdot \text{час (гВт ч)}; 1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 1 \text{ киловатт} \cdot \text{час (кВт ч)}.$$

Электрическая энергия измеряется счетчиками электрической энергии.

Пример 26. Определить мощность, потребляемую электрическим двигателем, если ток в цепи равен 8 А и двигатель включен в сеть напряжением 220 В:

$$P = IU = 8 \cdot 220 = 1760 \text{ Вт} = 17,6 \text{ гВт} = 1,76 \text{ кВт}.$$

Пример 27. Какова мощность, потребляемая электрической плиткой, если плитка берет из сети ток в 5 А, а сопротивление спирали плитки равно 24 Ом?

$$P = I^2 r = 25 \cdot 24 = 600 \text{ Вт} = 6 \text{ гВт} = 0,6 \text{ кВт}$$

Пример 28. Определить энергию, расходующую электрической плиткой мощностью 600 Вт в течение 5 ч:

$$A = Pt = 600 \cdot 5 = 3000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 30 \text{ гВт} \cdot \text{ч} = 3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Пример 29. Определить стоимость горения двенадцати электрических ламп в течение месяца (30 дней), если четыре из них по 60 Вт горят по 6 ч в сутки, а остальные восемь ламп по 25 Вт горят по 4 ч в сутки. Цена за энергию (тариф) 4 коп. за 1 кВт · ч. Мощность четырех ламп по 60 Вт

$$P = 60 \cdot 4 = 240 \text{ Вт}$$

Число часов горения этих ламп в месяц

$$t = 6 \cdot 30 = 180 \text{ ч.}$$

Энергия, расходуемая этими лампами,

$$A = Pt = 240 \cdot 180 = 43\,200 \text{ Вт ч} = 43,2 \text{ кВт ч.}$$

Мощность остальных восьми ламп по 25 Вт

$$25 \cdot 8 = 200 \text{ Вт.}$$

Число часов горения этих ламп в месяц

$$t = 4 \cdot 30 = 120 \text{ ч. Энергия, расходуемая этими лампами,}$$

$$A = P t = 200 \cdot 120 = 24\,000 \text{ Вт ч} = 24 \text{ кВт ч.}$$

Общее количество расходуемой энергии

$$43,2 + 24 = 67,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч. Стоимость всей энергии}$$

$$4 \cdot 67,2 = 268,8 \text{ коп.}$$

Второй закон Кирхгофа. применение законов кирхгофа для расчета электрических цепей

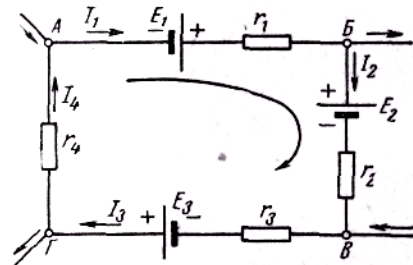


Рис. 10. Участок сложной электрической цепи

При расчете электрических цепей часто приходится встречаться с петлями, которые образуют замкнутые контуры. В состав таких контуров, помимо сопротивлений, могут входить еще электродвижущие силы.

На рис. 10 представлена часть сложной электрической цепи в виде замкнутого контура АБВГ. На схеме указаны полярность электродвижущих сил E_1 , E_2 , E_3 и направления токов I_1 , I_2 , I_3 и I_4 , протекающих на различных

участках цепи.

Обходим контур от точки А в произвольном направлении, например по часовой стрелке. Рассмотрим каждый из участков рассматриваемого контура. На первом участке разность потенциалов между точками А и Б, или, что то же самое, напряжение U_{AB} , равна э. д. с. E_1 минус падение напряжения $I_1 r_1$. Аналогично будет и на других участках цепи:

$$\text{на участке АБ } \varphi_A - \varphi_B = E_1 - I_1 r_1,$$

$$\text{на участке БВ } \varphi_B - \varphi_V = -E_2 - I_2 r_2,$$

$$\text{на участке ВГ } \varphi_V - \varphi_\Gamma = E_3 - I_3 r_3,;$$

$$\text{на участке ГА } \varphi_\Gamma - \varphi_A = I_4 r_4.$$

Складывая левые и правые части уравнения, получим:

$$\varphi_A - \varphi_B + \varphi_B - \varphi_V + \varphi_V - \varphi_\Gamma + \varphi_\Gamma - \varphi_A = E_1 - I_1 r_1 - E_2 - I_2 r_2 + E_3 - I_3 r_3 + I_4 r_4;$$

$$0 = E_1 - I_1 r_1 - E_2 - I_2 r_2 + E_3 - I_3 r_3 + I_4 r_4$$

Переносим произведения $(I r)$ в одну часть, а электродвижущие силы (E) в другую часть, получим

$$-E_1 + E_2 - E_3 = -I_1 r_1 - I_2 r_2 - I_3 r_3 + I_4 r_4$$

Или в общем виде

$$\sum E = \sum I r$$

Это выражение представляет собой второй закон Кирхгофа. Формула показывает, что во всяком замкнутом контуре алгебраическая сумма электродвижущих сил равна алгебраической сумме падений напряжений.

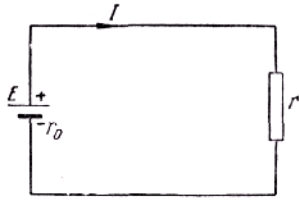


Рис. 11 Простой замкнутый контур

По второму закону Кирхгофа,

$$\sum E = \sum Ir.$$

Для простейшей замкнутой цепи с одной э.

д. с. E (рис. 11)

$E = Ir_0 + Ir = I(r_0 + r)$, откуда

$$I = \frac{E}{r_0 + r}$$

Мы получили формулу закона Ома для замкнутой цепи.

Следовательно, закон Ома является частным случаем 2-го закона Кирхгофа.

При расчете электрических цепей применяют различные методы расчета. Выбор того или иного метода зависит от конфигурации цепи, числа э. д. с, заданных величин.

Как правило, расчет неразветвленных цепей с любым числом э. д. с, а также расчет сложных цепей с одной э. д. с. легче производить, применяя закон Ома.

Расчет сложных цепей с несколькими э. д. с. производят с помощью уравнений 1-го и 2-го законов Кирхгофа.

Расчет сложной цепи методом законов Кирхгофа производят в следующем порядке:

Условно задаются направлениями токов в различных участках цепи.

Определяют число уравнений, которое необходимо составить для решения задачи. Если известны все э. д. с. и сопротивления цепи, число уравнений должно быть равно числу неизвестных токов.

Для составления уравнений вначале используют уравнения 1-го закона Кирхгофа. Число уравнений 1-го закона Кирхгофа на единицу меньше числа узловых точек в схеме. Остальное число уравнений составляют по 2-му закону Кирхгофа.

Для этого намечают контуры, направление обхода этих контуров и приступают к составлению уравнений. Если направление обхода не совпадает с направлениями э. д. с. или с направлениями токов на отдельных участках контура, то величины э. д. с. и падения напряжения $I r$ входят в уравнения со знаком минус.

Решая систему уравнений, находят величину токов.

Если окажется, что в результате решения уравнений некоторые из токов получились отрицательными, то это значит, что направление этих токов было выбрано неправильно. Надо изменить направления токов на схеме.

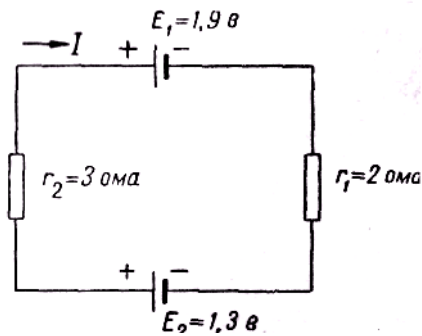


Рис.12 электрическая цепь (к примеру 30)

полученных Проверка правильности решения производится путем подстановки значений токов в одно из составленных уравнений.

Решим несколько задач, используя закон Ома и оба закона Кирхгофа.

Пример 30. Найти токи в цепи, представленной на рис. 12. Выберем произвольно положительное направление тока. Обходя контур по часовой стрелке, пишем уравнение второго закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} -E_1 + E_2 &= I_1 r_1 + I_2 r_2; \\ -1,9 + 1,3 &= I(2 + 3); \\ -0,6 &= 5I, \quad I = -0,12 \text{ А.} \end{aligned}$$

Знак минус означает, что выбранное нами направление тока противоположно его действительному направлению.

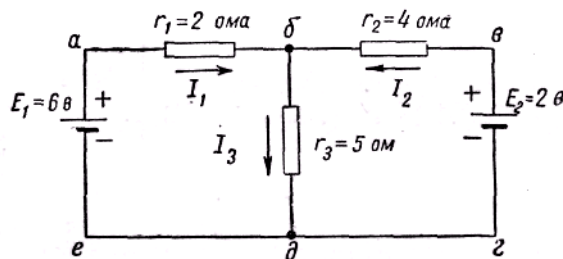


Рис.13 электрическая цепь (к примеру 31)

Пример 31. Дана электрическая цепь (рис. 13). Определить токи на отдельных участках.

Произвольно выбираем положительные направления токов. Для контура абде

$$6 = 2I_1 + 5I_3. \quad (1)$$

Для контура авге

$$6 - 2 = 2I_1 - 4I_2. \quad (2)$$

Для точки б, по первому за-

кону Кирхгофа,

$$I_3 = I_1 + I_2 \quad (3)$$

Имеем три уравнения с тремя неизвестными. Решая их, находим величину и направление токов. Подставляя значение тока I_3 из уравнения (3) в уравнение (1), получим

$$6 = 2I_1 + 5I_1 + 5I_2;$$

$$6 = 7I_1 + 5I_2$$

+

$$2 = I_1 + 2I_2$$

Или

$$12 = 14I_1 + 10I_2$$

+

$$10 = 5I_1 - 10I_2$$

Складывая два последних уравнения, имеем:

$$22 = 19I_1 \text{ откуда } I_1 = 1,156 \text{ A,}$$

подставляем значение I_1 в уравнение (1):

$$6 = 2 \cdot 1,156 + 5I_3,$$

$$I_3 = \frac{6 - 2 \cdot 1,156}{5} = 0,74 \text{ A.}$$

Подставляем значение I_1 в уравнение (2):

$$2 = 1,156 - 2I_2,$$

откуда

$$I_2 = \frac{-2 + 1,156}{2} = -0,422 \text{ A.}$$

Знак минус показывает, что действительное направление тока I_2 обратно принятому нами направлению.

Метод наложения

Метод наложения применяется для расчета электрических цепей, имеющих несколько э. д. с. Сущность метода 'наложения состоит в том, что ток в какой-либо части цепи можно считать состоящим из ряда частичных токов, создаваемых отдельными э. д. с, действующими независимо друг от друга.

Пример 32 (рис. 14, а). Дано: $E_1 = 27 \text{ В}$, $E_2 = 24 \text{ В}$, $r_1 = 3 \text{ Ом}$, $r_2 = 4 \text{ Ом}$, $r_3 = 6 \text{ Ом}$. Определить, как распределяются токи в цепи.

Найдем токи, созданные э. д. с. E_1 (э. д. с. E_2 принята равной нулю) (рис. 14,б). Выберем положительные направления токов, определим сопротивления

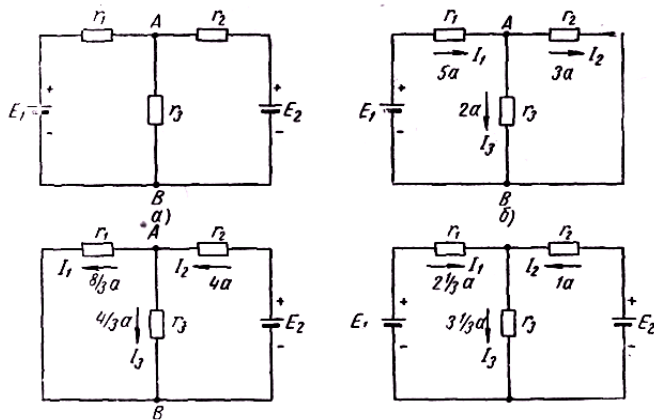


Рис14. Метод наложения (к примеру 32)

участков цепи и токи на каждом участке. Сопротивления r_2 и r_3 соединены параллельно. Поэтому сопротивление разветвления

$$R = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{4 \cdot 6}{4 + 6} = 2,4 \text{ Ом}$$

Полное сопротивление цепи

$$r = r_1 + r_{2,3} = 3 + 2,4 = 5,4 \text{ Ом.}$$

Ток на общем участке цепи

$$I = \frac{E_1}{r} = \frac{27}{5,4} = 5 \text{ A}$$

Напряжение между точками А и В

$$U_{AB} = E_1 - I_1 r_1 = 27 - 5 \cdot 3 = 12 \text{ В}$$

Ток в параллельных ветвях:

$$I = \frac{U_{AB}}{r_2} = \frac{12}{4} = 3 \text{ A}$$

$$I = \frac{U_{AB}}{r_3} = \frac{12}{6} = 2 \text{ A}$$

Проверка:

$$I_2 + I_3 = 3 + 2 = 5 \text{ A} = I_1$$

Найдем токи, созданные э. д. с. E_2 (э. д. с. E_1 принята равной нулю) (рис. 14,б). Выберем положительные направления токов, определим сопротивления участков цепи и токи на каждом участке. Сопротивления r_1 и r_3 соединены параллельно. Поэтому сопротивление разветвления

$$R = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = \frac{3 \cdot 6}{3 + 6} = 2 \text{ Ом}$$

$$r = r_2 + r_{1,3} = 4 + 2 = 6 \text{ Ом.}$$

$$I = \frac{U_{AB}}{r} = \frac{24}{6} = 4 \text{ A}$$

$$U_{AB} = E_2 - I_2 r_2 = 24 - 4 \cdot 4 = 8 \text{ В}$$

$$I = \frac{U_{AB}}{r_1} = \frac{8}{3} \text{ A}$$

$$I = \frac{U_{AB}}{r_3} = \frac{8}{6} \text{ A}$$

Проверка:

$$I_1 + I_3 = \frac{8}{3} + \frac{8}{6} = \frac{12}{3} \text{ A} = 4 \text{ A} = I_2$$

Сравнивая две последние схемы (рис. 14, б и в), видим, что на каждом участке (в каждой ветви) цепи протекают два тока. Произведя алгебраическое сложение этих токов (табл. 3), получим действительный ток каждого участка.

Таблица 3

Ток участка	Рис.44, б	Рис.44, в	Действительный ток и его направление
I_1	Вправо, 5 А	Влево, $8/3$ А	Вправо, $\frac{7}{3}$ А
I_2	Вправо, 3 А	Влево, 4 А	Влево, 1 А
I_3	Вниз, 2 А	Вниз, $4/3$ А	вниз, $\frac{10}{3}$ А

Проверка:

По первому закону Кирхгофа, для точки А имеем

$$I_1 + I_2 + I_3 = \frac{7}{3} + 1 - \frac{10}{3} = 0.$$

Токораспределение по схеме, представленной на рис. 39, а, дано на рис. 39, г.

Метод узлового напряжения

В практических задачах встречаются цепи, имеющие всего две узловые точки. Между узловыми точками может быть включено произвольное количество ветвей. Расчет таких цепей значительно упрощается, если пользоваться методом узлового напряжения.

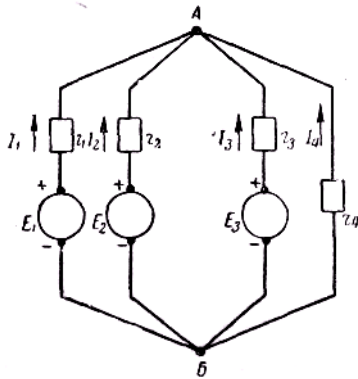


Рис.15 Метод узлового напряжения

Рассмотрим сущность этого метода. На рис. 15 изображена разветвленная электрическая цепь с двумя узловыми точками А и Б, между которыми включены четыре параллельные ветви. Три первые ветви имеют источники э. д. с. (генераторы) с э. д. с. E_1 , E_2 и E_3 . Последовательно с генераторами в этих ветвях включены сопротивления r_1 , r_2 и r_3 (к ним могут быть отнесены и внутренние сопротивления самих генераторов). В последней ветви включено сопротивление r_4 . Положительные направления токов в каждой ветви выбраны от точки Б к точке А. Если напряжение между узловыми точками А и Б обозначить U , то ток в первой ветви

$$I_1 = \frac{(E_1 - U)}{r_1} = (E_1 - U)g_1$$

т. е

$$I_1 = (E_1 - U)g_1$$

аналогично для остальных ветвей:

$$I_2 = (E_2 - U)g_2;$$

$$I_3 = (E_3 - U)g_3;$$

$$I_4 = (0 - U)g_4 = -Ug_4.$$

Применяя для узловой точки А первый закон Кирхгофа, будем иметь

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$$

Заменив токи их выражениями, последнее уравнение записываем так:

$$(E_1 - U)g_1 + (E_2 - U)g_2 + (E_3 - U)g_3 - Ug_4 = 0,$$

$$U = \frac{E_1g_1 + E_2g_2 + E_3g_3}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4}$$

Мы получили формулу узлового напряжения (т. е. напряжения между узловыми точками А и Б).

В числителе формулы представлена алгебраическая сумма произведений э. д. с. ветвей на проводимости этих ветвей. В знаменателе формулы дана сумма проводимостей всех ветвей. Если э. д. с. какой-либо ветви имеет направление, обратное тому, которое указано на рис. 40, то она входит в формулу для узлового напряжения со знаком минус. В общем виде формулу для узлового напряжения можно записать так:

$$U = \frac{\sum E g}{\sum g}$$

Пример 33. Дано: э. д. с. генераторов $E_1 = E_2 = 110 \text{ В}$, внутренние сопротивления генераторов: $r_{01} = 0,2 \text{ Ом}$, $r_{02} = 0,25 \text{ Ом}$, сопротивление внешней части цепи $r = 1 \text{ Ом}$. Определить токи генераторов.

Вычисляем узловое напряжение:

$$U = \frac{110 \frac{1}{0,2} + 110 \frac{1}{0,25}}{\frac{1}{0,2} + \frac{1}{0,25} + 1} = 99 \text{ В.}$$

Токи генераторов:

$$I_1 = (110 - 99) \frac{1}{0,2} = 55 \text{ А};$$

$$I_2 = (110 - 99) \frac{1}{0,25} = 44 \text{ А.}$$

Ток нагрузки

$$I_3 = \frac{99}{1} = 99 \text{ А.}$$

Метод контурных токов

Метод контурных токов можно применить для расчета сложных электрических цепей, имеющих больше двух узловых точек. На рис. 16,а изображена

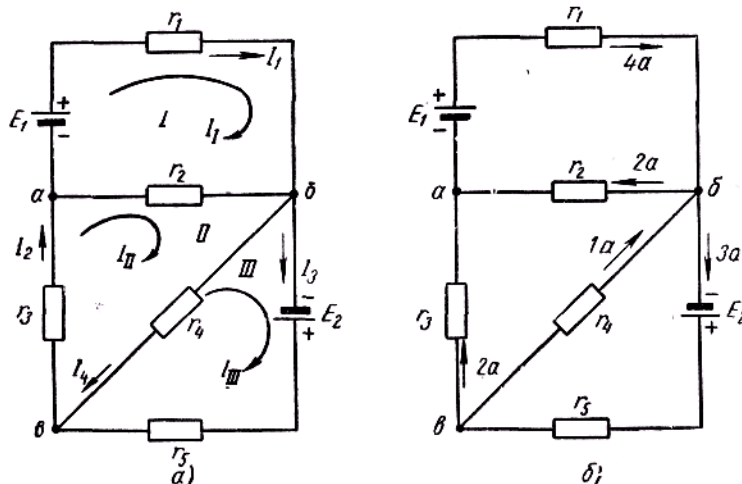


Рис16. Метод контурных токов

такая электрическая цепь. В ней три контура, причем средний контур имеет участки, входящие в состав двух соседних контуров, а также участки, которые входят в состав только одного контура.

Сущность метода контурных токов заключается в предположении, что в каждом контуре проходит свой ток (контурный ток).

Тогда на общих участках, расположенных на границе двух соседних контуров, будет протекать ток, равный алгебраической сумме токов этих контуров.

Выберем положительные направления трех контурных токов I_I , I_{II} , и I_{III} так, как указано на чертеже стрелками. Затем составим уравнения по второму закону Кирхгофа, обходя все три контура в одном направлении, например в направлении движения часовой стрелки. Для контура I:

$$E_1 = I_I r_1 - (I_I - I_{II}) r_2 \quad (\text{а})$$

для контура II:

$$0 = I_{II} r_3 + (I_{II} - I_I) r_2 + (I_{II} - I_{III}) r_4, \quad (\text{б})$$

для контура III;

$$E_2 = I_{III} r_5 - (I_{III} - I_{II}) r_4 \quad (\text{в})$$

Как мы видим, число уравнений равно числу контуров, т. е. число уравнений меньше, чем при решении задачи по 1-му и 2-му законам Кирхгофа. Решая систему уравнений, находим контурные токи, по которым определяются токи в ветвях:

$$I_1, I_2, I_3, I_4$$

Пример 34. Определить, как распределяются токи в цепи, представленной на рис. 16а, если $E_1 = 14\text{В}$, $E_2 = 20\text{В}$, $r_1 = 3\text{ Ом}$, $r_2 = 3\text{ Ом}$, $r_3 = 4\text{ Ом}$, $r_4 = 2\text{ Ом}$, $r_5 = 6\text{ Ом}$.

Решение.

Уравнение для контура *I* по формуле (а):

$$14 = 2I_1 + (I_1 - I_{II})3$$

$$14 = 2I_1 + 3I_1 - 3I_{II}$$

$$14 = 5I_1 - 3I_{II} \quad (a')$$

Уравнение для контура *II* по формуле (б):

$$0 = 4 I_{II} + (I_{II} - I_I)3 + (I_{II} - I_{III}) 2$$

$$0 = 4 I_{II} + 3I_{II} - 3I_I + 2I_{II} - 2 I_{III}$$

$$0 = 9 I_{II} - 3I_I - 2 I_{III}. \quad (б')$$

Уравнение для контура *III* по формуле (в):

$$20 = 6 I_{III} + (I_{III} - I_{II}) 2$$

$$20 = 6 I_{III} + 2 I_{III} - 2 I_{II}$$

$$20 = 8 I_{III} - 2 I_{II},$$

$$10 = 4 I_{III} - I_{II} \quad (в')$$

Складывая выражения (а') и (б'), получим:

$$14 = 5I_1 - 3I_{II}$$

+

$$0 = 9 I_{II} - 3I_I - 2 I_{III}$$

или

$$42 = 15I_1 - 9I_{II}$$

+

$$0 = 45I_{II} - 15I_I - 10I_{III} \quad (г')$$

$$42 = 36 I_{II} - 10 I_{III}$$

Складывая формулы (в') и (г'), получим:

$$10 = 4 I_{III} - I_{II}$$

$$42 = 36 I_{II} - 10 I_{III}$$

или

$$50 = 20 I_{III} - 5I_{II}$$

$$84 = 72 I_{II} - 20 I_{III}$$

$$134 = 67 I_{II}$$

откуда $I_{II} = 2\text{А}$.

Подставляя значение тока I_{II} в уравнение (в'), получим:

$$10 = 4 I_{III} - 2$$

$$10 + 2 = 4 I_{III},$$

откуда

$$I_{III} = 3\text{А}$$

Подставляя значение тока I_{II} в уравнение (а'), получим:

$$14 = 5 I_I - 6$$

$$20 = 5 I_I,$$

откуда

$$I_I = 4 \text{ А.}$$

Таким образом, все контурные токи найдены.

Определяем токи на отдельных участках цепи алгебраически, складывая протекающие по ним контурные токи. Токораспределение на отдельных участках цепи показано на рис. 16.

Задачи

1. Определить сопротивление 100 м железной проволоки диаметром 1 мм,
2. Каково сопротивление алюминиевого провода сечением $2,5 \text{ мм}^2$ и длиной 300 м
3. Необходимо изготовить реостат на 20 Ом из никелиновой проволоки. Определить сечение проволоки, если длина ее равна 5 м.
4. Сопротивление спирали электрической плитки равно 24 Ом. Какова должна быть длина нихромовой проволоки для этой спирали, если сечение проволоки $0,5 \text{ мм}^2$
5. 200 м проволоки сечением 4 мм^2 имеют сопротивление 6,5 Ом. Определить материал проводника.
6. Длина проводника 25 см. Материал проводника - вольфрам. Определить сечение проводника, если сопротивление проводника 0,05 Ом.
7. Вычислить сопротивление телеграфной проволоки диаметром 4 мм, длиной 150 км, если материалом проволоки является железо.
8. Проводимость нихромовой проволоки длиной 80 м равна $0,025 \frac{1}{\text{Ом}}$
Определить сечение проволоки.
9. Определить температуру обмотки электрической машины, выполненной из медной проволоки, если до включения машины ее сопротивление при 15° было 70 Ом и во время работы увеличилось до 85,05 Ом.
10. По нихромовой спирали электрической плитки проходит ток в 5 А. Сечение проволоки $0,6 \text{ мм}^2$. Определить длину проволоки, если плитка включена в сеть напряжением 120 В.
11. Имеется катушка медной проволоки сечением $0,5 \text{ мм}^2$. Длина проволоки 200 м. Какое напряжение должно быть приложено к катушке, чтобы в ней протекал ток в 4 А?
12. Для устойчивого горения дугового фонаря необходимо иметь 60 В и 10 А. Для питания фонаря установлен генератор с напряжением 120 В. Определить величину добавочного сопротивления к дуговому фонарю, если сопротивление соединительных проводов 0,2 Ом.

13. Вольтметр рассчитан на напряжение 20 В и ток 0,05 А. Чтобы вольтметр включить в сеть 100 В, необходимо включить добавочное сопротивление. Определить его величину.

14. При напряжении 60 В в цепи проходит ток 2,5 А. Какое дополнительное сопротивление необходимо включить, чтобы в цепи проходил ток в 2 А?

15. Электрическая цепь состоит из проводов сопротивлением 0,4 Ом, электрической лампы сопротивлением 150 Ом и реостата на 120 Ом. Каково сопротивление всей цепи, если провода, лампа и реостат включены последовательно?

16. Четыре проводника с сопротивлением 3, 4, 6 и 2 Ом включены между собой параллельно. Определить общее сопротивление этих проводников.

17. Определить сопротивление медного провода длиной 800 м, состоящего из семи проволочек диаметром по 1,7 мм.

18. Железная проволока длиной 20 м, сечением $1,5 \text{ мм}^2$, алюминиевая проволока длиной 50 м, сечением 2 мм^2 , нихромовая проволока длиной 10 м, сечением $0,5 \text{ мм}^2$ включены последовательно в сеть. Определить общее сопротивление всех проволок.

19. Первая ветвь параллельного соединения состоит из сопротивления 18 ом. Вторая ветвь состоит из трех последовательно включенных сопротивлений по 12 ом. Определить общее сопротивление разветвления.

20. Восемь проводников сопротивлением по 10 Ом каждый соединены в четыре одинаковые параллельные группы. Определить общее сопротивление цепи.

21. Проводник сопротивлением 7 Ом включен последовательно с разветвлением состоящим из четырех проводников в 2, 4, 6 и 8 Ом. Определить общее сопротивление цепи.

22. Разветвление из трех параллельно включенных сопротивлений в 3, 8 и 1 Ом включено последовательно с другим разветвлением, состоящим из четырех сопротивлений в 2, 7, 6 и 3 ом. Определить общее сопротивление цепи.

23. Три проводника соединены между собой параллельно. Сопротивление первого проводника 3 Ом, второго 4 Ом, третьего 6 Ом. Ток, протекающий по первому проводнику, равен 2 А. Определить общий ток.

24. Напряжение сети 12 В. Общий ток, потребляемый четырьмя параллельно включенными одинаковыми лампами, равен 8 А. Определить сопротивление каждой лампы.

25. Группа из трех параллельно соединенных проводников в 2, 9 и 10 Ом соединена последовательно с другой группой из четырех параллельно соединенных проводников в 2, 4, 6 и 3 Ом. Напряжение сети равно 30 В. Определить ток в каждом проводнике.

26. Напряжение генератора 110 В. В сеть включены параллельно сорок ламп по 200 Ом каждая. Определить э. д. с. генератора, если его внутреннее сопротивление 0,2 Ом.

27. Имеется разветвление, состоящее из четырех параллельно включенных сопротивлений в 6, 4, 3 и 8 Ом. Ток, притекающий к точке разветвления, 20 а. Определить ток, протекающий по каждой ветви.

28. Электродвигатель на 120 В, потребляющий ток в 25 А, установлен на расстоянии 200 м от источника электрической энергии. Определить сечение медных проводов, идущих к двигателю, если напряжение источника энергии 125 В.

29. Длина линии электропередачи 300 м. Линия выполнена медным проводом сечением 150 мм². Нагрузка потребляет ток 200 А. Какое напряжение на зажимах нагрузки, если напряжение на зажимах источника питания 240 В?

30. Сколько электрической энергии расходует электрическая печь в течение 30 мин, если она потребляет ток 10 А при напряжении 120 В?

31. На цоколе лампы накаливания написано: 200 Вт, 220 В. Определить сопротивление нити накаливания.

32. Мощность электрического двигателя 3 кВт. Чему равен ток в обмотке этого двигателя, если напряжение сети равно 120 В?

33. Электродвигатель, подключенный к сети 220 В, потребляет ток в 8 А. Какова мощность двигателя, какое количество энергии он потребляет за 2 ч 30 мин?

34. В квартире имеется шесть ламп. Две из них мощностью по 40 Вт горят в сутки по 5 ч, две мощностью по 60 Вт горят по 6 ч и две по 15 Вт горят по 4 ч. Сколько нужно заплатить за горение всех ламп в течение месяца (30 дней) при тарифе 4 коп. за 1 кВт·ч?

35. Электрический двигатель мощностью 5 кВт, напряжением 110 В установлен на пилораме. Энергию двигателю дает генератор, расположенный на расстоянии 150 м от двигателя. Напряжение генератора поддерживается равным 120 в. Определить: а) сечение медных проводов, идущих от генератора к двигателю, б) мощность генератора, в) потерю мощности в проводах.

36. На электростанции установлен генератор напряжением 240 В. Энергия подается потребителю на расстояние 200 м. Потребитель забирает из сети ток 60 А. Потеря мощности в проводах равна 10% от мощности, отдаваемой генератором. Определить сечение медных проводов линии.

37. К генератору, дающему для гальваностегии ток 900 А напряжением 6 В, установлен бензиновый двигатель. Определить мощность этого двигателя в лошадиных силах, если к. п. д. передачи 95%.

38. Генератор дает мощность 10 кВт при напряжении равном 115 В. Энергия передается по алюминиевым проводам сечением 95 мм² на расстояние 250 м. Определить мощность, получаемую потребителем.

Контрольные вопросы:

1. Что такое электрический ток?
2. Что такое сила и плотность тока? В каких единицах они измеряются?
3. Какова причина электрического сопротивления?
4. В каких единицах измеряется сопротивление?

5. От чего зависит сопротивление проводника?
6. Что такое удельное сопротивление?
7. Что такое проводимость и удельная проводимость?
8. Какой формулой описывается зависимость сопротивления проводников от температуры?
9. Чему равно общее сопротивление последовательно соединенных проводников?
10. Чему равно общее сопротивление параллельно соединенных проводников?
11. Как распределяются токи в параллельно соединенных проводниках?
12. Запишите формулы для вычисления работы и мощности электрического тока.
13. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца.
14. Что такое потеря напряжения в линии?
15. Как влияет напряжение в линии электропередачи на потери мощности в проводах?
16. Что такое ЭДС источника тока?
17. Сформулируйте закон Ома для замкнутой цепи.
18. Сформулируйте первое правило Кирхгофа.
19. Сформулируйте второе правило Кирхгофа.
20. Сформулируйте правило знаков при использовании правил Кирхгофа.
21. Что такое шунтирование?

Практическое занятие №2

Тема: «Расчёт цепей, содержащих конденсаторы при различных способах соединения».

Теоретический материал:

Представим себе систему, состоящую из двух проводников, разделенных диэлектриком. Если проводникам сообщить одинаковые по величине, но противоположные по знаку заряды ($+q$ и $-q$), то между проводниками будет определенная разность потенциалов или напряжение U .

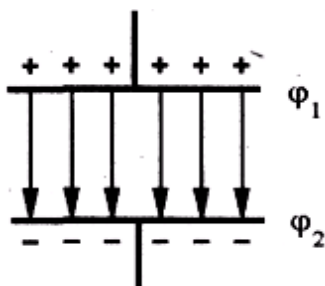


Рис42

Между зарядом q и напряжением U существует линейная зависимость: чем больше заряд q , тем больше величина U , и наоборот.

Отношение заряда проводников к напряжению между ними есть величина постоянная, называемая электрической емкостью:

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

Единица емкости - фарада. Это емкость такого устройства, которое заряжается 1 кулоном электричества при разности потенциалов в 1 вольт.

Обычно пользуются более мелкими единицами

$$1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф};$$

$$1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Из вышесказанного следует, что величина емкости C определяет, насколько возрастет разность потенциалов при сообщении проводникам того или иного электрического заряда.

Емкостью принято также называть свойство проводящих тел накапливать и удерживать электрические заряды. Емкость в той или иной мере присуща различным электрическим устройствам. Во многих случаях емкость настолько значительна, что ее приходится принимать во внимание; например, емкость между проводами электрической линии, емкость проводов относительно земли и т. д.

В различных электроустановках для определенных целей применяют специальные аппараты обладающие значительной емкостью при относительно малых габаритах. Эти аппараты называются- **конденсаторами**.

Электрической емкостью конденсатора называется скалярная величина, характеризующая его свойство накапливать и сохранять электрические



Рис43

заряды и связанное с этими зарядами электрическое поле. Электрическая емкость конденсатора равна отношению заряда одной из пластин к напряжению между ними:

$$C = \frac{Q}{U}$$



Рис44 . обозначения конденсаторов Постоянный. Переменный

Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

Конденсаторы бывают воздушные, слюдяные, керамические, бумажные, электролитические.

Емкость плоского конденсатора:

Учитывая, что $U = Ed$, а $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{Q}{R^2}$,

получаем: $C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{Ed} = \frac{Q}{(Q/\epsilon_0\epsilon S)d} = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{d}$

$$C = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{d}$$

Энергия заряженного конденсатора:

$$W_9 = \frac{CU^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0\epsilon \cdot S}{d} E^2 d^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0\epsilon E^2 Sd = \frac{1}{2} \epsilon_0\epsilon_r E^2 V$$

Из этой формулы видно, что энергия заряженного конденсатора зависит от напряженности электрического поля между обкладками, диэлектрической проницаемости диэлектрика и объема, в котором существует поле, т. е. от величин, относящихся к электрическому полю заряженного конденсатора. Это говорит о том, что **энергия заряженного конденсатора сосредоточена в его электрическом поле.**

$$W_9 = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$

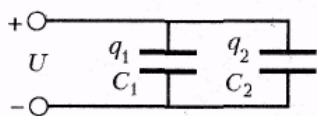
Пример35. $C = 1 \text{ мкФ}$, $U = 2000 \text{ В}$:

$$\text{энергия } W = \frac{CU^2}{2} = 2 \text{ Дж},$$

$$\text{мощность } P = \frac{A}{t} = \frac{2 \text{ Дж}}{10^{-6} \text{ с}} = 2 \cdot 10^6 \text{ Вт}.$$

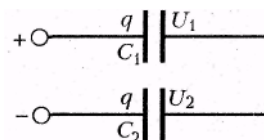
Соединения конденсаторов в батарею

• Параллельное. • Последовательное.



1. $q = q_1 + q_2$
2. $U = U_1 = U_2$
3. $\frac{q_1}{C_1} = \frac{q_2}{C_2} \Rightarrow \frac{q_1}{q_2} = \frac{C_1}{C_2}$
4. $CU = C_1U_1 + C_2U_2$

$$C = C_1 + C_2 + \dots$$



1. $q = q_1 = q_2$
2. $U = U_1 + U_2$
3. $C_1U_1 = C_2U_2 \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$
4. $\frac{q}{C} = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2}$
 $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$

Следовательно, при параллельном соединении конденсаторов общая емкость равна сумме емкостей отдельных конденсаторов. При параллельном соединении каждый конденсатор окажется включенным на полное напряжение сети, поэтому параллельно соединять можно только те конденсаторы, у которых рабочее напряжение больше или равно напряжению сети.

при последовательном соединении конденсаторов обратная величина общей емкости равна сумме обратных величин емкостей отдельных конденсаторов. Каждый из конденсаторов включен на меньшее напряжение, чем напряжение сети, что позволяет при последовательном соединении конденсаторов их рабочее напряжение выбирать меньшим, чем напряжение сети.

Конденсаторы широко применяются в радиотехнике и промышленной электротехнике.

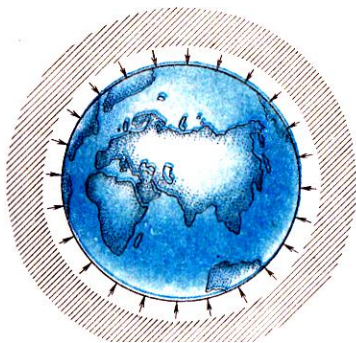
Назначение конденсаторов:

- не пропускать постоянный ток,

- накапливать на короткое время заряд для быстрого изменения потенциала.

Свойство конденсатора накапливать и сохранять электрические заряды используется, в частности, для получения кратковременных импульсов большой силы тока.

Пример36. Земля и проводящие слои атмосферы образуют своеобразный конденсатор. Наблюдениями установлено, что напряженность электрического поля Земли вблизи ее поверхности в среднем равна 100В/м. Найдите электрический заряд Земли, считая, что он равномерно распределен по всей земной поверхности.



Анализ условия. Электрическую емкость системы Земля - проводящий слой можно приближенно определить по формуле плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}$$

где S - площадь поверхности Земли, d - высота проводящего слоя атмосферы. Заряд Земли найдем по формуле $Q = CU$, где U - разность потенциалов между Землей и высотным проводящим слоем.

Решение. Пользуясь приведенными выше формулами, получаем:

$$Q = CU = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} Ed = \epsilon_0 SE.$$

Но $S = 4\pi R^2$, где R - радиус Земли. Поэтому $Q = 4\pi \epsilon_0 ER^2$.

Подставляя значения величин

$$R = 6370 \cdot 10^6 \text{ м};$$

$$\epsilon_0 = \frac{1 \text{ Кл}^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2};$$

$$E = 100 \text{ В/м},$$

$$\text{Находим } Q \approx 4,5 \cdot 10^5 \text{ Кл}.$$

Задачи

1. К пластинам плоского конденсатора приложено напряжение $U = 3 \text{ кВ}$. Найти напряженность электрического поля E , если расстояние между пластинами конденсатора $d = 7,5 \text{ мм}$.

2. Определить емкость плоского конденсатора, если площадь каждой пластины $S = 50 \text{ см}^2$, расстояние между пластинами $d = 5 \text{ мм}$ и относительная электрическая проницаемость диэлектрика (стекла) $\epsilon = 5$.

3. Три конденсатора, емкости которых равны $C_x = 5 \text{ мкФ}$, $C_2 = 10 \text{ мкФ}$ и $C_3 = 15 \text{ мкФ}$, включены параллельно в сеть напряжением 120 В. Определить эквивалентную емкость и энергию батареи конденсаторов.

4. Последовательно включены три конденсатора: $C_1 = 2 \text{ мкФ}$, $C_2 = 3 \text{ мкФ}$ и $C_3 = 6 \text{ мкФ}$. Определить эквивалентную емкость и энергию батареи конденсаторов, если напряжение, приложенное к цепи, $U = 100 \text{ В}$.

5. При сообщении металлическому шару, находящемуся в воздухе, заряда $2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ его потенциал оказался равным 18 кВ . Определить радиус шара.

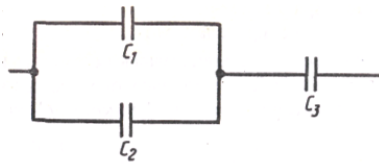


Рис45

6. Определить электроемкость батареи конденсаторов, изображенной на рис. 45, если $C_1 = C_2 = 2 \text{ нФ}$ и $C_3 = 500 \text{ пФ}$.

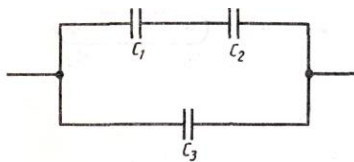


Рис46

7. В паспорте конденсатора указано: " 150 мкФ ; 200 В ". Какой наибольший допустимый электрический заряд можно сообщить данному конденсатору?

8. Определить электроемкость батареи конденсаторов, изображенной на рис. 46, если $C_1 = 0,1 \text{ мкФ}$, $C_2 = 0,4 \text{ мкФ}$ и $C_3 = 0,52 \text{ мкФ}$.

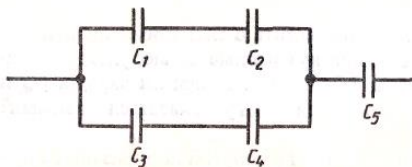


Рис47

9. Плоскому конденсатору емкостью 500 пФ сообщен заряд $2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$. Определить энергию электрического поля конденсатора.

10. Какой электроемкостью обладает Земля? Радиус Земли $6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$.

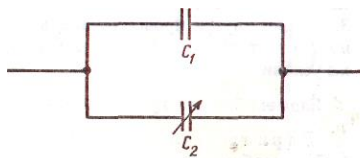


Рис48

11. Определить электроемкость батареи конденсаторов, изображенной на рис. 47, если $C_1 = 2 \text{ мкФ}$, $C_2 = 4 \text{ мкФ}$, $C_3 = 1 \text{ мкФ}$, $C_4 = 2 \text{ мкФ}$, $C_5 = 6 \text{ мкФ}$.

12. При сообщении конденсатору заряда $5 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$ его энергия оказалась равной $0,01 \text{ Дж}$. Определить напряжение на обкладках конденсатора.

13. Какой заряд надо сообщить проводящему шару, находящемуся в воздухе, чтобы электрический потенциал был 1 В , если радиус шара 9 Мм ?

14. В каких пределах может изменяться электрическая емкость изображенной на рис. 48 цепи, состоящей из конденсатора постоянной емкости $C_1 = 400 \text{ пФ}$ и конденсатора переменной емкости $C_2 = (100 - 800) \text{ пФ}$?

15. Напряженность электрического поля конденсатора емкостью $0,8 \text{ мкФ}$ равна 1000 В/м . Определить энергию конденсатора, если расстояние между его обкладками равно 1 мм .

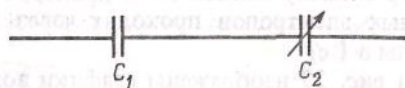


Рис49

16. Какой электроемкостью обладает проводящий шар радиусом 20 см в воде, удельный от других проводников?

17. В каких пределах может изменяться электроемкость цепи, изображенной на рис. 49,

состоящей из конденсатора

18. постоянной емкости $C_1 = 100 \text{ пФ}$ и конденсатора переменной емкости $C_2 = (400 - 900) \text{ пФ}$?

19. Определить емкость плоского конденсатора, состоящего из 51 пластины площадью 20 см^2 каждая, если между ними проложена слюда толщиной $0,1 \text{ мм}$ ($\epsilon = 7$).

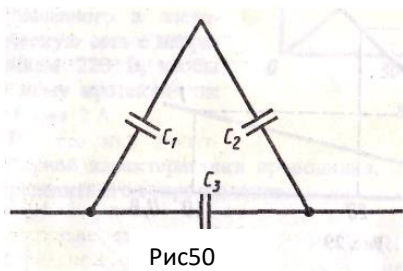


Рис50

20. Если проводнику сообщить заряд 10^{-8} Кл , то его электрический потенциал увеличится на 100 В . Определить емкость проводника.

21. Определить емкость батареи конденсаторов, изображенной на рис. 50, если емкости конденсаторов одинаковы и равны 600 мкФ каждая.

Контрольные вопросы

1. Что называется электрической емкостью?
2. В чем измеряется электрическая емкость?
3. От чего зависит емкость плоского конденсатора?
4. Как устроены конденсаторы постоянной емкости?
5. Как устроены и работают конденсаторы переменной емкости?
6. Для чего применяется параллельное соединение конденсаторов?
7. Для чего применяется последовательное соединение конденсаторов?
8. Обладает ли незаряженный проводник емкостью?
9. Изменится ли энергия заряженного воздушного конденсатора, если раздвинуть его пластины? Объяснить.

Практическое занятие №3

Тема: «Расчёт основных характеристик магнитного поля. Расчёт ЭДС индукции и магнитных цепей»

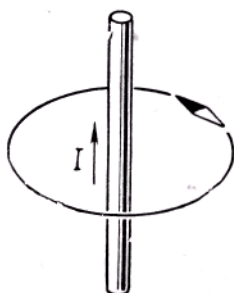


Рис51. Влияние электрического тока на магнитную стрелку

Практическое занятие 3. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

1. Расчёт основных характеристик магнитного поля.

Магнитное поле проводника с током

Если к прямолинейному проводнику с током поднести магнитную стрелку, то она будет стремиться стать перпендикулярно плоскости, проходящей через ось проводника и центр вращения стрелки (рис. 51). Это указывает на то, что на стрелку действуют особые силы, которые называются магнитными. Иными словами, если по проводнику проходит электрический ток, то вокруг проводника возникает магнитное поле. Магнитное поле можно рассматривать как особое состояние пространства, окружающего проводники с током.

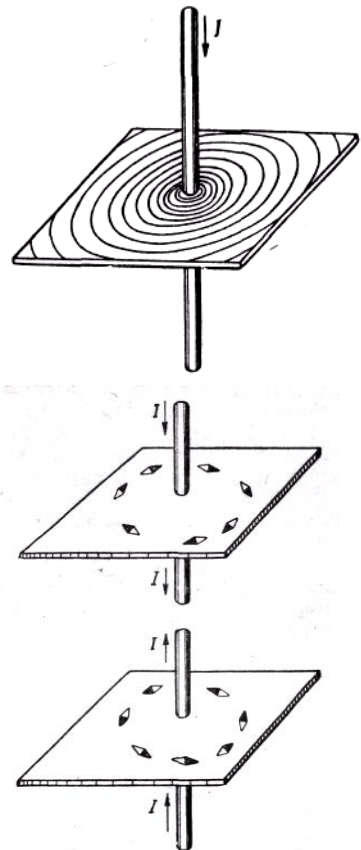


Рис53. Направление сило-

Если продеть через картон толстый проводник и пропустить по нему электрический ток, то стальные опилки, насыпанные на картон, расположатся вокруг проводника по концентрическим окружностям, представляющим собой в данном случае так называемые магнитные линии (рис. 52). Мы можем передвигать картон вверх или вниз по проводнику, но расположение стальных опилок не изменится. Следовательно, магнитное поле возникает вокруг проводника по всей его длине.

Если на картон поставить маленькие магнитные стрелки, то, меняя направление тока в проводнике, можно увидеть, что магнитные стрелки будут поворачиваться (рис. 53). Это показывает, что направление магнитных линий меняется с изменением направления тока в проводнике.

Магнитное поле вокруг проводника с током обладает следующими особенностями: магнитные линии прямолинейного проводника имеют форму концентрических окружностей; чем ближе к проводнику, тем плотнее располагаются магнитные линии, тем больше магнитная индукция; магнитная индукция (интенсивность поля) зависит от величины тока в проводнике; направление магнитных линий зависит от направления тока в проводнике.

Чтобы показать направление тока в проводнике, изображенном в разрезе, принято условное обозначение, которым мы в дальнейшем будем пользоваться.

Если мысленно поместить в проводнике стрелу по направлению тока (рис. 54), то в проводнике, ток в котором направлен от нас, увидим хвост оперения стрелы (крестик); если же ток направлен к нам, увидим острие стрелы (точку).

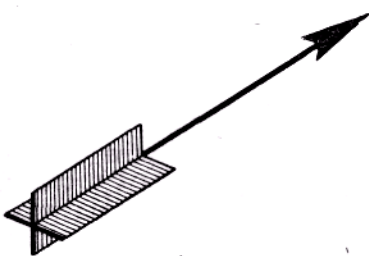


Рис54. Условное обозначение токов в проводнике

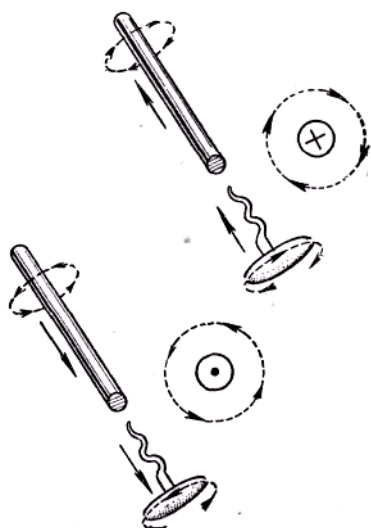


Рис55. Определение направления магнитных линий вокруг проводника с током по «правилу буравчика»

Направление магнитных линий вокруг проводника с током можно определить по «правилу буравчика». Если буравчик (штопор) с правой резьбой будет двигаться поступательно по направлению тока, то направление вращения ручки будет совпадать с направлением магнитных линий вокруг проводника (рис. 55).

Магнитная стрелка, внесенная в поле проводника с током, располагается вдоль магнитных линий. Поэтому для определения ее расположения можно также воспользоваться «правилу буравчика» (рис. 22).

Магнитное поле есть одно из важнейших проявлений электрического тока и не может быть получено независимо и отдельно от тока.

В постоянных магнитах магнитное поле также вызывается движением электронов, входящих в состав атомов и молекул магнита.

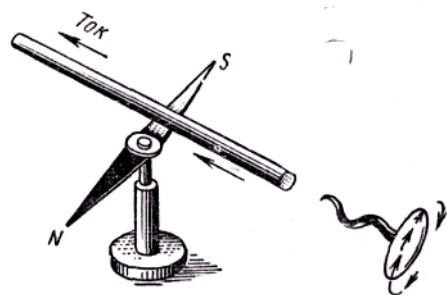


Рис56. Определение направления отклонения магнитной стрелки поднесённой к проводнику с током по «правилу буравчика»

Интенсивность магнитного поля в каждой его точке определяется величиной магнитной индукции, которую принято обозначать буквой **В**. Магнитная индукция является векторной величиной, т. е. она характеризуется не только определенным значением, но и определенным направлением в каждой точке магнитного поля. Направление вектора магнитной индукции совпадает с касательной к магнитной линии в данной точке поля (рис. 56).

В результате обобщения опытных данных французские ученые Био и Савар установили, что магнитная индукция **В** (интенсивность магнитного поля) на расстоянии r от бесконечно длинного прямолинейного проводника с током определяется выражением

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

где r - радиус окружности, проведенной через рассматриваемую точку поля; центр окружности находится на оси проводника ($2\pi r$ - длина окружности); I - величина тока, протекающего по проводнику.

Величина μ_a , характеризующая магнитные свойства среды, называется абсолютной магнитной проницаемостью среды.

Для пустоты абсолютная магнитная проницаемость имеет минимальное значение и ее принято обозначать μ_0 и называть *абсолютной магнитной проницаемостью пустоты*.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{генри}}{\text{метр}}$$

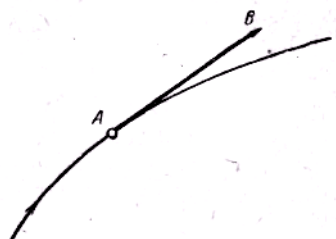


Рис57. Магнитная индукция в т А

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{сек.}$$

Отношение $\frac{\mu_a}{\mu_0}$ -, показывающее, во сколько раз абсолютная магнитная

проницаемость данной среды больше абсолютной магнитной проницаемости пустоты, называется относительной магнитной проницаемостью и обозначается буквой μ .

В Международной системе единиц (СИ) приняты единицы измерения магнитной индукции В - **Тесла** или вебер на квадратный метр ($\text{Тл} = \text{Вб}/\text{м}^2$).

В инженерной практике магнитную индукцию принято измерять в гауссах (ее): $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$.

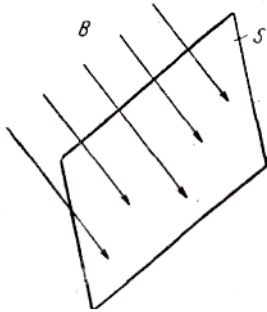


Рис58. Поток вектора магнитной индукции

Если во всех точках магнитного поля вектора магнитной индукции равны по величине и параллельны друг другу, то такое поле называется однородным.

Произведение магнитной индукции В на величину площадки S, перпендикулярной направлению поля (вектору магнитной индукции), называется потоком вектора магнитной индукции, или просто магнитным потоком, и обозначается буквой Φ (рис. 58):

$$\Phi = BS.$$

В Международной системе в качестве единицы измерения магнитного потока принят вебер (Вб).

В инженерных расчетах магнитный поток измеряют в максвеллах (мкс):

$$1 \text{ Вб} = 10^8 \text{ мкс.}$$

При расчетах магнитных полей пользуются также величиной, называемой напряженностью магнитного поля (обозначается Н).

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

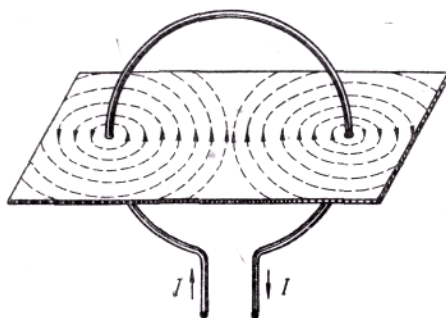


Рис59. Круговой проводник с током

Магнитная индукция В и напряженность магнитного поля Н связаны соотношением

$$B = \mu_a H$$

Единица измерения напряженности магнитного поля Н - ампер на метр (А/м).

Напряженность магнитного поля в однородной среде, так же как магнитная индукция, зависит от величины тока, числа и формы про-

водников, по которым проходит ток. Но в отличие от магнитной индукции напряженность магнитного поля не учитывает влияния магнитных свойств среды.

Электромагниты

Круговой проводник с током. Возьмем проводник, согнутый по кругу в виде витка, и пропустим по нему ток (рис. 59). Из чертежа видно, что магнитные линии замыкаются вокруг проводника с током и имеют форму окружностей. Магнитные линии с одной стороны входят в плоскость кругового проводника, с другой - выходят. Направление поля кругового тока можно определить, пользуясь «правилом буравчика».

Буравчик нужно расположить по оси кругового тока перпендикулярно его плоскости. Если теперь вращать ручку буравчика по направлению тока в контуре, то поступательное движение буравчика покажет направление магнитного поля. Напряженность магнитного поля в центре витка с током определяется по формуле

Переходя к магнитной индукции, имеем

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

где r - радиус витка;

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

D - диаметр витка.

Соленоид. Магнитную индукцию поля можно значительно увеличить,

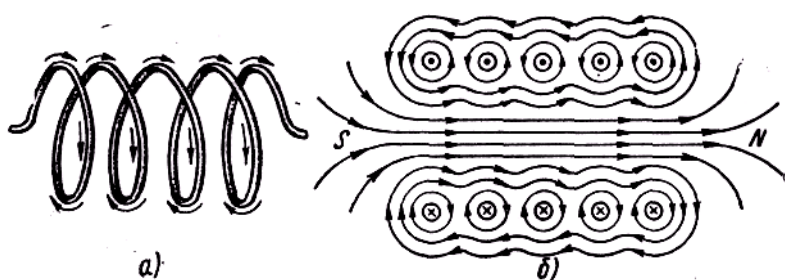


Рис.60. Соленоид (а) и его магнитное поле (б)

если проводнику, по которому пропускают электрический ток, придать форму спирали с большим числом витков. Такая проволоочная спираль называется соленоидом (рис. 60, а).

Если мысленно разрезать витки соленоида поперек, обозначить направление тока в них, как было указано выше, и определить направление магнитных линий по «правилу буравчика», то общее магнитное поле соленоида будет иметь такой вид, как показано на рис.60. б.



Рис 61. Определение полюсов соленоида

На оси бесконечно длинного соленоида, на каждой единице длины которого намотано ω витков, напряженность поля определяется формулой

$$H = I\omega.$$

В том месте, где магнитные линии имеют направления внутрь соленоида, образуется

южный полюс, где они направлены из соленоида - северный.

Для определения полюсов соленоида пользуются «правилом буравчика», применяя его следующим образом: если расположить буравчик вдоль оси соленоида и вращать его по направлению тока в витках соленоида, то поступательное движение буравчика покажет направление магнитного поля (рис. 61).

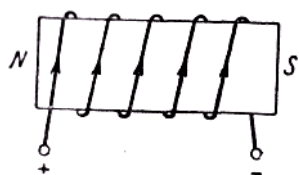


Рис 62. электромагнит

Соленоид, внутри которого находится стальной (железный) сердечник, называется электромагнитом (рис. 62). Магнитное поле у электромагнита значительно сильнее, чем у соленоида, так как кусок стали, вложенный в соленоид, намагничивается и результирующее магнитное поле усиливается. Полюсы у электромагнита можно определить, так же как и у соленоида, по «правилу буравчика».

Магнитный поток электромагнита усиливается с увеличением числа его витков и тока, протекающего по виткам.

Обмотка электромагнита возбуждает (создает) необходимый магнитный поток и поэтому во многих случаях ее называют *обмоткой возбуждения*.

Электромагниты широко применяются в технике. Они служат для создания магнитного поля в электрических генераторах и двигателях, в электроизмерительных приборах, электрических аппаратах и других устройствах.

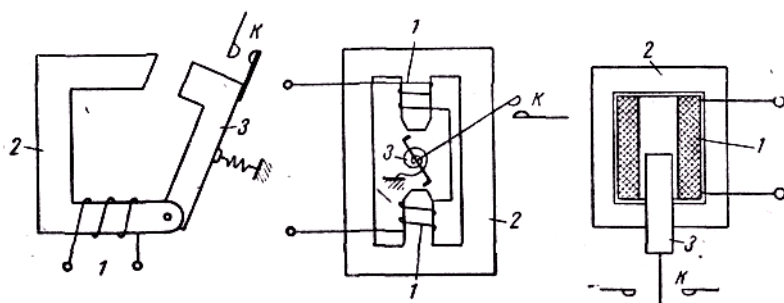


Рис 63. Электромагнитные реле

К этим устройствам относятся и электромагнитные реле, т. е. приборы или автоматы, реагирующие на изменения тока, напряжения, мощности и т. д.

На рис. 63 представлены некоторые конструкции электромагнитных реле. Работа этих реле основана на взаимодействии магнитного поля, создаваемого неподвижной катушкой, по которой проходит ток, и стального подвижного якоря. При изменении тока в цепи катушки 1 магнитный поток в сердечнике 2 усиливается, и его величина оказывается достаточной для того, чтобы повернуть или втянуть якорь 3. При этом замыкаются контакты К в цепи управления (например, в цепи отключающей катушки выключателя и т. д.). Реле нашли применение в автоматике, телемеханике, системах электроснабжения.

Закон полного тока

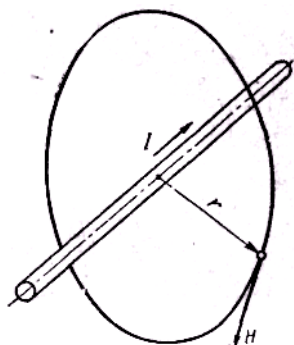


Рис 64. К закону полного тока

На рис. 64 показан проводник с током I , пронизывающий поверхность, ограниченную замкнутым контуром в виде окружности. Пусть центр окружности лежит на оси проводника. В пространстве, окружающем проводник с током, возникает магнитное поле. Так как отдельные точки контура находятся от проводника на равных расстояниях, то напряженность поля, созданная током в каждой точке контура, будет также одинаковой. Направление вектора напряженности поля $\mathbf{H}$ зависит от направления тока в проводнике и определяется по «правилу буравчика». Вектор $\mathbf{H}$ располагается по касательной к окружности контура.

Путем опытов и расчетов установлено, что произведение напряженности поля H в точках контура на длину этого контура l равно току I , пронизывающему поверхность, ограниченную данным контуром.

Таким образом,

$$Hl = I.$$

В общем случае поверхность могут пронизывать несколько токов. Тогда определяют так называемый полный ток, т. е. находят алгебраическую сумму токов (ΣI). Для этого случая можно записать:

$$Hl = \Sigma I.$$

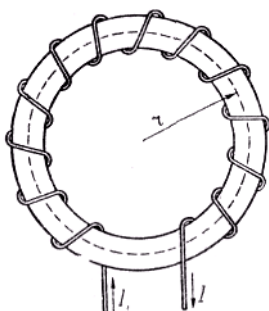


Рис 65. К определению напряжённости поля катушки намотанной на кольцо

Это выражение носит название закона полного тока. Закон полного тока является основным законом при расчете магнитных цепей и дает возможность в некоторых случаях легко определить напряженность поля.

Например, применив закон полного тока для определения напряженности магнитного поля в точке на расстоянии r от бесконечно длинного прямолинейного проводника с током (рис. 65), имеем следующее: полный ток равен току в проводнике $\Sigma I = I$; контур, проведенный на расстоянии r от проводника, совпадает с магнитной линией; длина контура l будет $l = 2\pi r$,

поэтому $H 2\pi r = I$, откуда $H = \frac{I}{2\pi r}$.

Переходя к магнитной индукции, будем иметь $B = \mu_a \frac{I}{2\pi r}$, т. е. мы получили то же выражение для магнитной индукции, которое было приведено выше для такого же случая. Применим закон полного тока для определения напряженности поля по оси катушки, равномерно намотанной на кольцо (рис. 31). Контуром здесь является ось катушки (она же ось кольца). Площадь контура пронизывает полный ток, равный произведению тока I на число витков ω катушки, т. е. $\Sigma I = I\omega$. Обозначив длину оси катушки через l , запишем закон полного тока:

$$H l = I\omega, \text{ откуда } H = \frac{I\omega}{l}$$

или, переходя к магнитной индукции, будем иметь

$$B = \mu_a \frac{I\omega}{l}$$

Если сечение кольцевой катушки обозначить S , то магнитный поток, проходящий внутри катушки, будет

$$\Phi = BS = \mu_a \frac{I\omega}{l} S$$

Разрезав кольцо и выпрямив катушку, мы получим соленоид. Для соленоида бесконечно большой длины формулы для напряженности поля H по оси соленоида, магнитной индукции B и магнитного потока Φ те же, что и для кольцевой катушки. Однако на практике, имея дело с соленоидами ограниченной длины, для определения H , B и Φ пользуются теми же формулами.

Намагничивающая сила. закон Ома для магнитной цепи

Когда по катушке, состоящей из ω витков, проходит ток I , то он возбуждает магнитный поток Φ , величина которого будет тем больше, чем больше будет число ампер-витков $I\omega$. Произведение тока I на число витков ω называется намагничивающей силой (НС) и обозначается буквой F . Так как ω - число отвлеченное, то намагничивающая сила измеряется в Амперах. Если взять соленоид, число витков которого равно 150, и пропустить по его обмотке ток 5 А, то число Ампер-витков будет $5 \cdot 150 = 750 \text{ А}\omega$. Тот же магнитный поток можно получить, если намотать 1500 витков и пропустить по ним ток 0,5 А, так как $0,5 \cdot 1500 = 750 \text{ А}\omega$.

Ранее было получено выражение для магнитного потока соленоида

$$\Phi = \mu_a \frac{I\omega}{l} S$$

Это выражение можно представить в ином виде:

$$\Phi = \frac{\frac{I\omega}{l}}{\frac{1}{\mu_a S}}$$

По своему строению эта формула напоминает формулу закона Ома для электрической цепи. Выражение $\frac{l}{\mu_a S}$, стоящее в знаменателе, называется магнитным сопротивлением и обозначается R_M .

Выражение для магнитного потока запишем теперь в следующем виде:

$$\Phi = \frac{F}{R_M}$$

Таким образом, магнитный поток Φ пропорционален намагничивающей силе F и обратно пропорционален магнитному сопротивлению R_M . Эту зависимость называют законом Ома для магнитной цепи.

Намагничивание ферромагнитных материалов

По характеру магнитных свойств все вещества можно разделить на две группы:

ферромагнитные вещества, магнитная проницаемость которых велика. К ним принадлежат железо, сталь, чугун, никель, кобальт и некоторые сплавы (алюминия с никелем и др.);

немагнитные вещества, магнитная проницаемость которых незначительно отличается от магнитной проницаемости пустоты. К ним относятся

алюминий, медь, олово, ртуть, серебро, дерево, вода и др.

Ферромагнитные материалы имеют очень важное значение в электротехнике и радиотехнике. Эти материалы (в основном сталь) благодаря большой магнитной проницаемости получили широкое применение в различных электромагнитах, электрических генераторах, электродвигателях, трансфор-

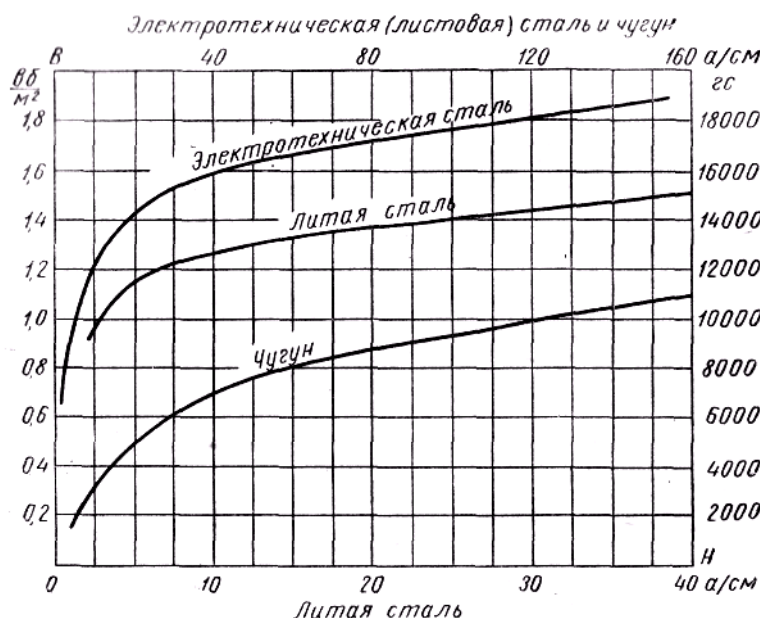


Рис 66. Кривые намагничивания электротехнической стали, литой стали и чугуна

маторах, электроизмерительных приборах, реле и т. д.

Зависимость между B и H у ферромагнитных материалов обычно выражается графически в виде так называемой кривой намагничивания. Для построения кривой по горизонтальной оси обычно откладывают напряженность магнитного поля H , а по вертикальной оси откладывают величину магнитной индукции B , $\frac{вб}{м^2}$ или гауссах.

На рис. 66 приведены кривые намагничивания электротехнической стали, литой стали и чугуна. Величины напряженности магнитного поля для литой стали даны на нижней горизонтали, для электротехнической стали и чугуна — на верхней горизонтали. Из рассмотрения кривой намагничивания видно, что с увеличением напряженности H магнитная индукция B сначала быстро возрастает, затем в месте изгиба кривой скорость роста B уменьшается и, наконец, за изгибом кривая незначительно поднимается вверх, переходя в прямую линию. Последний участок кривой характеризует состояние магнитного насыщения материала.

Из кривой намагничивания видно, что отношение $\frac{B}{\mu_0 H} = \mu$ не является постоянной величиной; с увеличением H и B магнитная проницаемость уменьшается.

Магнитная проницаемость ферромагнитных тел зависит также от химического состава металла, его предварительной термической и механической

обработки, температуры металла. Кроме того, магнитная проницаемость этих тел зависит от их формы и геометрических размеров.

Кривые намагничивания снимаются опытным путем отдельно для каждого материала и каждого сорта этого материала.

Гистерезис

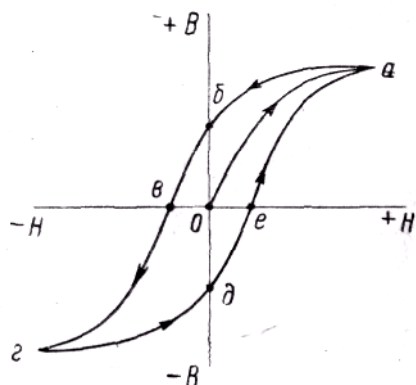


Рис 67. Петля гистерезиса

(Слово «гистерезис» означает отставание, запаздывание.)

Рассмотрим процесс переменного намагничивания ферромагнитного материала. Для этой цели намотаем на стальной сердечник обмотку и будем по ней пропускать постоянный ток. Предположим, что сердечник электромагнита ранее не был намагничен. Увеличивая проходящий по виткам обмотки ток I от нуля, мы тем самым будем увеличивать намагничивающую силу и напряженность поля H . Величина магнитной индукции B в сердечнике будет также увеличиваться. Кривая намагничивания Oa на рис. 67 имеет прямолинейную часть, а затем вследствие насыщения кривая поднимается медленно, приближаясь к горизонтали. Если теперь, достигнув точки a , начнем уменьшать H , то будет уменьшаться и B . Однако уменьшение B при уменьшении H , т. е. при размагничивании, будет происходить с запаздыванием по отношению к уменьшению H . Величина остаточной индукции при $H = 0$ характеризуется отрезком Ob .

Магнитная индукция, которая остается в ферромагнитном теле при напряженности поля, равной нулю, называется остаточной индукцией, или остаточным магнетизмом.

Небольшим остаточным магнетизмом обладают чистое железо, мягкая сталь, сплавы железа с кремнием (электротехническая сталь), сплавы стали с никелем (пермаллой). Эти металлы и сплавы легко намагничиваются и так же легко размагничиваются. Они нашли себе применение при изготовлении сердечников электромагнитов, трансформаторов, полюсных наконечников, якорей генераторов и т. п.

Наибольшим остаточным магнетизмом обладают специальные сорта твердых сталей: вольфрамовой, хромистой, кобальтовой, никельалюминиевой. Эти стали применяются для изготовления постоянных магнитов.

Для того чтобы магнитная индукция в сердечнике стала равной нулю, необходимо намагничивать материал в обратном направлении, т. е. перемагничивать его. Для этой цели направление тока в обмотке меняется на обратное. Направление магнитных линий и напряженности поля также изменяется. При напряженности поля $H = 0$ индукция в сердечнике равна нулю, и материал сердечника полностью размагничен. Значение напряженности поля $H = 0$ при $B = 0$ является определенной характеристикой материала и называется *задерживающей (коэрцитивной) силой*.

Повторяя процесс перемагничивания, мы получаем замкнутую кривую *абвгдеа*, называемую петлей гистерезиса (см. рис. 33). На этом опыте легко убедиться, что намагничивание и размагничивание сердечника (появление и исчезновение магнитной индукции и магнитного потока) отстают от момента появления и исчезновения тока в обмотке электромагнита. Явление гистерезиса можно иными словами охарактеризовать как отставание изменений магнитной индукции от изменений намагничивающей силы. Перемагничивание материала связано с затратой некоторого количества энергии, которая выделяется в виде тепла, нагревающего материал.

Гистерезис особенно сильно сказывается, если материал сердечника обладает большим остаточным магнетизмом (например, твердая сталь). Явление

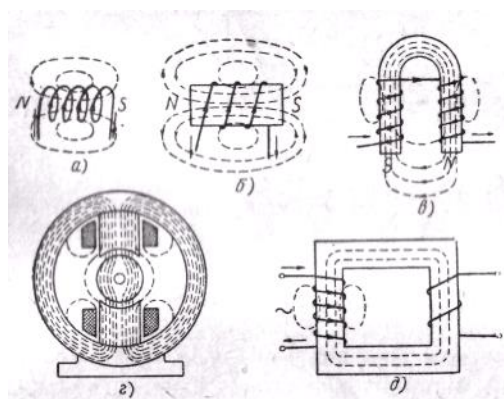


Рис 68. Примеры магнитных цепей

гистерезиса в большинстве случаев вредно. Оно сопровождается нагревом сердечника, лишней затратой мощности источника напряжения, а также гудением сердечника вследствие перемены полярности и поворотов элементарных частиц материала сердечника.

Первое серьезное исследование процессов намагничивания стали было проведено Александром Григорьевичем Столетовым (1839- 1896) в

1872 г.

магнитные цепи и их расчет

Магнитной цепью называется путь, по которому замыкается магнитный поток.

На рис. 68, а показан соленоид. Магнитная цепь здесь проходит через воздух. Магнитное сопротивление воздуха очень велико, поэтому даже при большой намагничивающей силе магнитный поток мал.

Для увеличения магнитного потока в состав магнитной цепи вводят ферромагнитные материалы (обычно литая или электротехническая сталь), имеющие меньшее магнитное сопротивление. Устройство, выполненное из ферромагнитных материалов, в котором замыкается магнитный поток, называется магнитопроводом, или сердечником. На рис. 68, б представлен прямой электромагнит с разомкнутым сердечником. Магнитные линии только небольшую часть своего пути проходят по стальному сердечнику, большую же часть своего пути они проходят по воздуху. Полюсы электромагнита можно определить при помощи «правила буравчика».

Подковообразный электромагнит, изображенный на рис. 68, в, представляет магнитную цепь с лучшими условиями для прохождения магнитного потока. При такой конструкции поток Φ большую часть пути проходит по стали и меньшую часть от полюса N до полюса S по воздуху.

На рис. 68, г представлена конструкция магнитной цепи, применяемая в электромашиностроении и приборостроении. Между полюсами электромагнита помещается стальной якорь. Большую часть своего пути магнитные линии проходят по стали и только очень малую часть (от нескольких долей миллиметра до 2-3 мм) проходят по двум воздушным промежуткам.

Трансформаторы имеют замкнутый стальной сердечник (рис. 68, д). Сердечники трансформаторов собирают из нескольких частей, но во время сборки принимают меры к тому, чтобы воздушные зазоры между отдельными частями практически были равны нулю.

До сих пор мы не говорили о том, что магнитный поток, созданный намагничивающей силой, не весь замыкается по тому пути, который ему предназначен. Помимо рабочего магнитного потока, существует магнитный поток рассеяния, который замыкается по воздуху вне того места, где используется рабочий поток. На рис., 68, б, в, г, д показан также поток рассеяния.

Таким образом, общий магнитный поток, который должна создать обмотка возбуждения электромагнита, равен сумме рабочего потока и потока рассеяния.

Расчет магнитной цепи, казалось бы, можно производить по формуле

$$\Phi = \frac{I\omega}{\frac{l_{cp}}{\mu_a S}}$$

Но если вспомнить, что относительная магнитная проницаемость μ , для ферромагнитных тел непостоянна и зависит от многих причин, то становится ясно, что этой формулой можно пользоваться лишь в том случае, когда в состав магнитной цепи входят только немагнитные тела (в том числе и воздух), для которых μ есть заранее заданная постоянная величина.

На практике для расчета магнитных цепей предпочитают пользоваться графическими методами решения.

Расчет магнитной цепи производят в следующем порядке. Задаются необходимой величиной магнитного потока. Разбивают магнитную цепь на участки, имеющие одинаковые поперечные сечения и однородный материал, и для каждого участка определяют величину магнитной индукции по формуле

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Затем по кривым намагничивания для данного материала находят для каждого значения магнитной индукции величину H . Если в магнитной цепи встречаются воздушные зазоры, зависимость между B_0 и H_0 определяется по формуле

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0 10^7}{4\pi} = 80 \cdot 10^4 \frac{B_0}{\text{м}}$$

Здесь B_0 выражено в $\frac{\text{Вб}}{\text{м}}$.

Если индукция выражена в гауссах, а напряженность - в $\frac{\text{Вб}}{\text{см}}$,

То зависимость между B_0 и H_0 будет

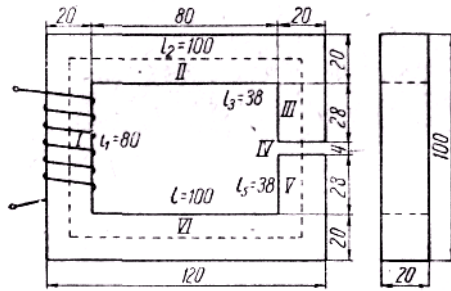


Рис.69. К примеру расчёта магнитной цепи

$$H_0 = 0,8 B_0.$$

Определив величину H для каждого участка, находим по закону полного тока величину необходимой намагничивающей силы по формуле

$$I\omega = H_0 l_0 + H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n$$

Пример 37. Найти намагничивающую силу обмотки электромагнита, изображенного на рис. 69. Размеры даны в миллиметрах. Материал сердечника - электротехническая сталь. В сердечнике необходимо создать магнитный поток 60 000 мкс. Магнитным рассеянием пренебрегаем.

Проводим среднюю линию по всей длине магнитной цепи. Разбиваем цепь на пять участков и определяем длину каждого участка.

Так как магнитный поток во всех участках одинаков и площадь поперечного сечения всех участков магнитной цепи одинакова (2x2 см), то магнитная индукция также будет везде одинакова:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{60000 \text{ мкс}}{4 \text{ см}^2} = 15000 \text{ Гс}$$

По кривой намагничивания (рис. 32) для электротехнической стали по индукции 15 000 Гс находим напряженность магнитного поля $H = 30 \text{ А/см}$. Для воздушного зазора имеем

$$H_0 = 0,8 \cdot 15000 = 12000 \frac{\text{А}}{\text{см}}$$

Умножая величины напряженности на длину соответствующих участков, получаем произведения $H l$ для этих участков.

Результаты вычислений записываем в таблицу (табл. 4).

Таблица 4

№ участков	Материал	B	l	H	Hl
		гс	см	а/см	а
I	Электротехн. сталь	15 000	8	30	240
II и VI	Электротехн. сталь	15 000	10x2	30	600
III и V	Электротехн. сталь	15 000	3,8 X 2	30	228
IV	Воздух	15 000	0,4	12 000	4800

$$I\omega = \Sigma(Hl) = 5868 \text{ А}.$$

Интересно отметить, что если на участках из электротехнической стали I, II, III, V и VI общей протяженностью 35,6 см (8 + 20 + 7,6 см) для проведения магнитного потока необходима намагничивающая сила 1068 А (240 + 600 + 228 А), то на воздушный зазор длиной всего 4 мм (в ,89 раз меньше длины пути по стали) нужна намагничивающая сила 4800 А. Отсюда становится понятной

необходимость создания магнитных цепей с минимальными воздушными зазорами.

Проводник с током в магнитном поле

Если внести проводник с током в магнитное поле (рис. 70, а), то в результате сложения магнитных полей магнита и проводника произойдет усиление результирующего магнитного поля с одной стороны проводника (на чертеже сверху) и ослабление магнитного поля с другой стороны проводника (на чертеже снизу).

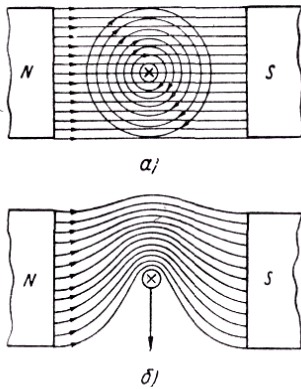


Рис.70. Взаимодействие проводника с током и магнитного поля

В результате действия двух магнитных полей произойдет искривление магнитных линий, и они, стремясь сократиться, будут выталкивать проводник вниз (рис. 70, б).

Сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле, называется электромагнитной силой. Направление этой силы можно определить по «правилу левой руки»: если левую руку расположить в магнитном поле так, чтобы маг-

нитные линии, выходящие из северного полюса, как бы входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца совпадали с направлением тока в проводнике, то большой отогнутый палец руки покажет направление действия силы (рис. 71).

Из рис. 72 видно, что направление силы, действующей на проводник, можно изменить, либо меняя полюсы и изменяя этим направление магнитного поля, либо меняя направление тока в проводнике.

Если же поменять направление поля и направление тока в проводнике одновременно, то направление силы, действующей на проводник, не изменится.

Сила F , действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле (рис. 73), зависит от величины магнитной индукции B , величины тока I в проводнике, активной длины проводника l и синуса угла α между вектором индукции и направлением тока в проводнике:

$$F = BIl \sin \alpha$$

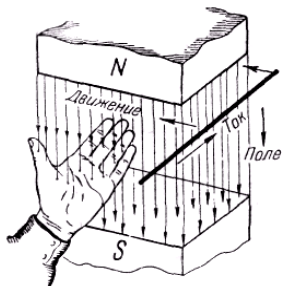


Рис.71. Определение направления

си
тс

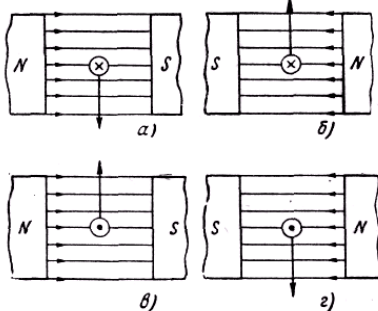


Рис.72 зависимость направления силы Ампера от направления тока в проводнике и поля
правления тока в проводнике

Для прямолинейного проводника с током, помещенного перпендикулярно к направлению магнитного поля, сила, действующая на проводник, будет равна

$$F = BIl, \text{ так как в этом случае } \alpha = 90^\circ \text{ и } \sin \alpha = 1.$$

Вышеприведенная формула является выражением закона электромагнитных сил. Электромагнитные силы, действующие на проводники с током, которые расположены в магнитном поле, используются в различных электродвигателях для получения вращающего момента, иными словами, для преобразования электрической энергии в механическую. В электрических генераторах (т. е. машинах, преобразующих механическую энергию в электрическую) эти силы создают тормозящий (противодействующий) момент, который преодолевается первичным двигателем, приводящим в движение генератор.

Электромеханические воздействия магнитного поля на проводники с током используются также в магнитоэлектрических измерительных приборах, применяемых в цепях постоянного тока.

взаимодействие проводников с током

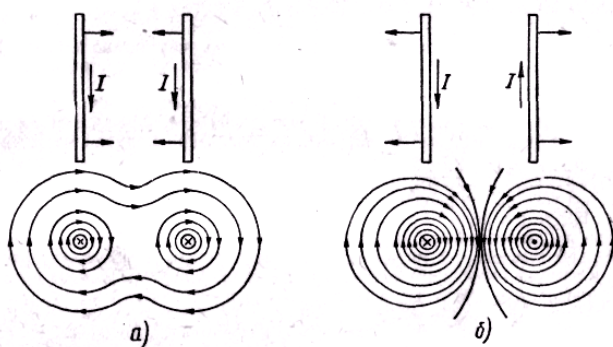


Рис 74. Взаимодействие проводников с током

Если близко один к другому расположены проводники с токами одного направления, то магнитные линии этих проводников, охватывающие оба проводника, обладая свойством продольного натяжения и стремясь сократиться, будут заставлять проводники притягиваться (рис. 74, а).

Магнитные линии двух проводников с токами разных направлений в пространстве между проводниками направлены в одну сторону. Магнитные линии, имеющие одинаковое направление, будут взаимно отталкиваться. Поэтому проводники с токами противоположного направления отталкиваются один от другого (рис. 74, б).

Рассмотрим взаимодействие двух параллельных проводников с токами, расположенными на расстоянии a один от другого. Пусть длина проводников равна l .

Магнитная индукция, созданная током I_1 на линии расположения второго проводника, равна

$$B_1 = \mu_a \frac{I_1}{2\pi a}$$

На второй проводник будет действовать электромагнитная сила

$$F_2 = I_2 B_1 = \mu_a \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l$$

Магнитная индукция, созданная током I_2 на линии расположения второго проводника, равна

$$B_2 = \mu_a \frac{I_2}{2\pi a}$$

На второй проводник будет действовать электромагнитная сила

$$F_1 = I_1 B_2 = \mu_a \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l$$

равная по величине силе F_2

На электромеханическом взаимодействии проводников с током основан принцип действия электродинамических измерительных приборов, используемых в цепях постоянного и в особенности переменного тока.

Задачи

1. Определить напряженность магнитного поля, создаваемого током 100 А, проходящим по длинному прямолинейному проводнику в точке, удаленной от проводника на 10 см.
2. Определить напряженность магнитного поля, создаваемого током 20 А, проходящим по кольцевому проводнику радиусом 5 см в точке, расположенной в центре витка.
3. Определить магнитный поток, проходящий в куске никеля, помещенного в однородное магнитное поле напряженностью 500 А/м. Площадь поперечного сечения куска никеля 25 см² (относительная магнитная проницаемость никеля 300).
4. Прямолинейный проводник длиной 40 см помещен в равномерное магнитное поле под углом 30° к направлению магнитного поля. По проводнику проходит ток 50 А. Индукция поля равна 5000 гс. Определить силу, с которой проводник выталкивается из магнитного поля.
5. Определить силу, с которой два прямолинейных, параллельно расположенных в воздухе проводника отталкиваются один от другого. Длина проводников 2 м, расстояние между ними 20 см. Токи в проводниках по 10 А.
6. На рис. 94 даны схема атома водорода и направление движения электрона. Определить магнитные полюсы атома водорода.

7. Под каким углом к линиям индукции однородного магнитного поля должен быть расположен проводник с активной длиной 0,4 м, чтобы поле индукцией 0,8 Тл действовало на проводник силой 1,6 Н, если по нему проходит ток 5 А?

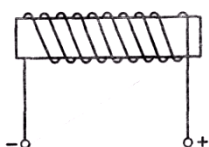


Рис. 75

8. Изобразить графически магнитное поле соленоида по данным рис 75.

9. Два металлических проводника с токами одного направления притягиваются, а два параллельных потока свободных электронов одного направ-

ления в вакууме отталкиваются. Как в первом, так и во втором случаях происходит направленное движение свободных электронов, однако характер наблюдаемых явлений различный. Почему?

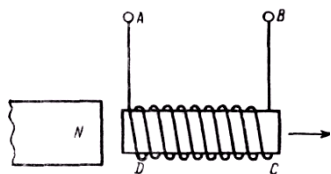


Рис.76

10. Определить индукцию магнитного поля, в котором на прямой провод длиной 10 см, расположенный под углом 30° к линиям индукции, действует сила 0,2 Н, когда по проводнику проходит ток 8 А.

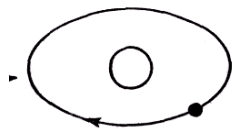


Рис.77

11. На рис. 76 показано взаимное положение постоянного магнита и соленоида. В каком направлении идет ток в соленоиде, если он отталкивается от магнита?

12. На рис. 77 даны схема атома водорода и направление движения электрона вокруг ядра. Определить магнитные полюсы атома водорода и графически изобразить линии индукции этого поля.

13. На проводник с активной длиной 0,4 м, помещенный в однородное магнитное поле индукцией 0,8 Тл, действует сила 1,6 Н. Определить силу тока в проводнике при условии, что он расположен перпендикулярно линиям индукции.

14. При каких условиях возникает магнитное поле?

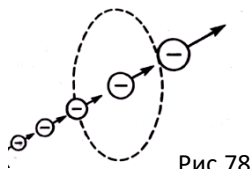


Рис.78

15. На рис. 78 даны направление движения потока электронов и линия индукции магнитного поля вокруг потока электронов. Определить направление линий индукции магнитного поля.

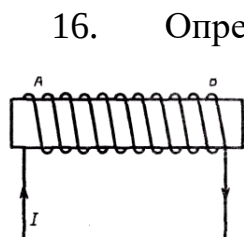


Рис.79

16. Определить длину активной части проводника, помещенного в однородное магнитное поле индукцией 1,2 Тл под углом 30° к линиям индукции, если при силе тока 10 А на проводник действует сила 1,8 Н.

17. Определить магнитные полюсы соленоида по направлению тока, указанному на рис. 79.

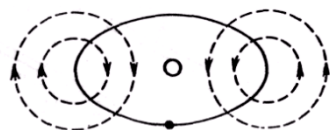


Рис.80

18. На рис. 80 даны схема атома водорода и направление линий индукции магнитного поля тока, созданного движением электрона вокруг ядра атома. Определить направление движения электрона.

19. В однородном магнитном поле индукцией 2 Тл находится прямолинейный проводник длиной 0,1 м, на который действует сила 0,8 Н. Определить угол между направлением тока в проводнике и направлением вектора ин-

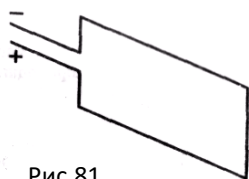


Рис.81

дукции магнитного поля, если сила тока в проводнике 4 А.

20. Определить направление и графически изобразить линии индукции магнитного поля тока, текущего по рамке (рис. 81).

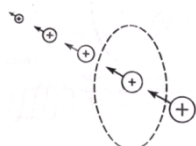


Рис.82

21. На рис. 82 показаны направление движения α -частиц (α -частицы - ядра атомов гелия) и линия индукции магнитного поля вокруг потока этих частиц. Определить направление линий индукции магнитного поля.

22. На проводник с активной длиной 0,5 м, помещенный в однородное магнитное поле индукцией 0,4 Тл, действует сила 2 Н. Определить силу тока в проводнике, если он расположен перпендикулярно линиям индукции магнитного поля.

23. Как взаимодействуют проводники с током, показанные на рис. 83?



Рис. 83

Вопросы для повторения.

1. На каком опыте можно убедиться, что вокруг проводника с током образуется магнитное поле?
2. Каковы свойства магнитных линий?
3. Как определить направление магнитных линий?
4. Что называется соленоидом и каково его магнитное поле?
5. Как определить полюсы соленоида?
6. Что называется электромагнитом и как определить его полюсы?
7. Что такое гистерезис?
8. Каковы формы электромагнитов?
9. Как взаимодействуют между собой проводники, по которым течет электрический ток?
10. Что действует на проводник с током в магнитном поле?
11. Как определить направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле?
12. На каком принципе основана работа электродвигателей?
13. Какие тела называются ферромагнитными?

2. Расчёт ЭДС индукции и магнитных цепей

Получение индуцированной электродвижущей силы (э.д.с.)

Явление возникновения э. д. с. в контуре при пересечении его магнитным полем называется электромагнитной индукцией и было открыто английским физиком М. Фарадеем в 1831 г.

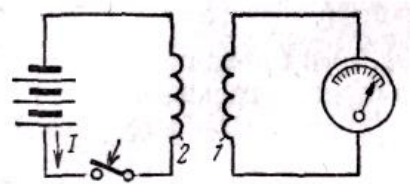


Рис 84. взаимная индукция

Если к замкнутому проводнику 1 (рис. 84) приближать (или удалять) проводник 2, по которому проходит электрический ток 1, то в проводнике 1 будет индуцироваться э.д.с. Точно так же, если оба проводника 1 и 2 оставлять неподвижными, но изменять ток, либо разрывать или замыкать цепь, в которую входит проводник 2, то в про-

воднике 1 будет появляться индуцированная э.д.с. Возникновение э. д. с. во втором контуре вследствие изменения тока в первом контуре называется взаимной индукцией. Она имеет место в трансформаторах, индукционных катушках и т. д. Индуцированную э. д. с. можно получить еще следующим образом. Известно, что проводник, по которому течет электрический ток, окружен магнитным полем. Если изменять величину или направление тока в проводнике или размыкать и замыкать электрическую цепь, питающую проводник током, то магнитное поле, окружающее этот проводник, будет изменяться. Изменяясь, магнитное поле проводника пересекает этот же самый проводник и наводит в нем э. д. с. Это явление называется самоиндукцией. Сама индуцированная э. д. с. называется э. д. с. самоиндукции.

Величина и направление индуцированной э.д.с.

Индуцированная э. д. с. возникает в следующих трех случаях:

когда движущийся проводник пересекает неподвижное магнитное поле или, наоборот, перемещающееся магнитное поле пересекает неподвижный проводник; или когда проводник и магнитное поле, двигаясь в пространстве, перемещаются один относительно другого;

когда переменное магнитное поле одного проводника, действуя на другой проводник, индуцирует в нем э. д. с. (взаимная индукция);

когда изменяющееся магнитное поле какого-либо проводника индуцирует в нём самом э. д. с. (самоиндукция).

Таким образом, всякое изменение во времени величины магнитного потока ($\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$), пронизывающего проводящий контур (виток, рамку), сопровождается появлением в этом проводниковом контуре индуцированной э. д. с. e :

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

где $\Delta\Phi$ - магнитный поток, пересеченный проводником за промежуток времени Δt .

Величина индуцированной э. д. с. в проводнике зависит:

от величины индукции B магнитного поля, так как чем плотнее расположены магнитные линии, тем большее число их пересечет проводник за единицу времени (секунду);

от скорости движения проводника v в магнитном поле, так как при большей скорости движения проводник может больше пересечь магнитных линий в секунду;

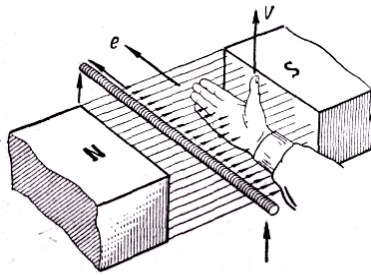


Рис 85. Определение направления индуцированной ЭДС в проводнике по «правилу правой руки»

от активной (находящейся в магнитном поле) длины проводника, так как длинный проводник может больше пересечь магнитных линий в секунду;

от величины синуса угла α между направлением движения проводника и направлением магнитного поля (рис. 85).

Величина индуцированной э. д. с. может быть найдена по формуле

$$e = B l v \sin \alpha,$$

где B - величина магнитной индукции, Тл; l - активная длина проводника, м; v - скорость движения проводника, м/сек;

α - угол пересечения. Как было отмечено выше, направление индуцированной э.д.с. зависит от направления движения проводника и от направления магнитного поля.

Для определения направления индуцированной э. д. с. в проводнике, движущемся в магнитном поле, служит «правило правой руки». Оно заключается в следующем: *если мысленно расположить правую руку в магнитном поле вдоль проводника так, чтобы магнитные линии, выходящие из северного полюса, входили в ладонь, а большой отогнутый палец совпадал с направлением движения проводника, то четыре вытянутых пальца будут показывать направление э. д. с, индуцированной в проводнике* (рис. 85).

В случаях, когда проводник остается неподвижным, а магнитное поле движется, для определения направления индуцированной э. д. с. следует предположить, что поле остается неподвижным, а проводник движется в сторону, обратную движению поля, и применить также «правило правой руки».

Преобразование механической энергии в электрическую и обратно

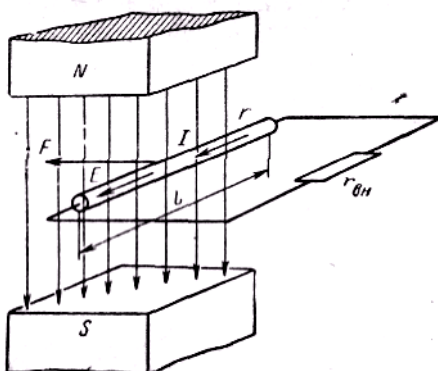


Рис86. Преобразование механической энергии в электрическую

На законах электромагнитной индукции и электромагнитных сил основано действие электрических машин - генераторов, преобразующих механическую энергию в электрическую, и двигателей, преобразующих электрическую энергию в механическую.

Обратимся к рис. 86. В магнитном поле между полюсами N и S помещен прямолинейный проводник. Если при помощи внешней механической силы F передвигать этот проводник перпендикулярно магнитным линиям поля, то в нем будет индуцироваться э.д.с. $E = Blv$. Если концы проводника замкнуты на внешнее сопротивление, то по цепи потечет ток I , совпадающий по направлению с э.д.с. E .

Напишем уравнение 2-го закона Кирхгофа для этой цепи:

$$E = U + Ir, \quad (a)$$

где

U - напряжение на зажимах, В;

r - сопротивление проводника, ом;

Ir - падение напряжения в проводнике, В.

Умножая почленно выражение (a) на I , получим

$$EI = UI + I^2r.$$

Так как $E = Blv$, то

$$BlvI = UI + I^2r.$$

Учитывая, что $BlI = F$ и $Fv = P_{\text{мех}}$ имеем

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{эл}} + \Delta P, \quad (б)$$

где $P_{\text{мех}} = EI$ - механическая мощность, преобразуемая в электрическую;

$P_{\text{эл}} = UI$ - электрическая мощность, отдаваемая во внешнюю цепь;

$\Delta P = Pr$ - потери мощности (в виде тепла) в сопротивлении проводника.

Рассмотрим теперь процесс преобразования электрической энергии в механическую.

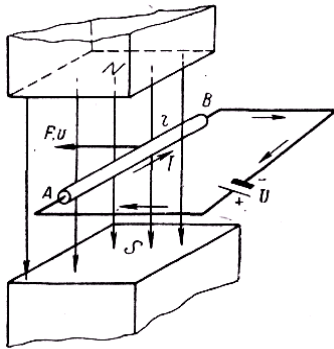


Рис 87 преобразование электрической энергии в механическую

Пусть прямолинейный проводник АВ (рис. 87), по которому проходит ток I от источника напряжения, помещен во внешнее магнитное поле, образованное магнитом N - S. Если проводник неподвижен, то энергия источника напряжения расходуется исключительно на нагрев проводника:

$$A = UIt = I^2rt \text{ Дж.}$$

Затрачиваемая мощность будет равна

$$P_{\text{эл}} = UI = I^2r \text{ Вт,}$$

откуда определяем ток в цепи: $I = \frac{U}{r} \quad (a)$

Однако известно, что проводник с током, помещенный в магнитное поле, будет испытывать действие силы F со стороны поля, стремящейся перемещать проводник в магнитном поле в направлении, определяемом правилом левой руки. При своем движении проводник будет пересекать магнитные линии поля и в нем, по закону электромагнитной индукции, возникнет индуцированная э. д. с. Направление этой э. д. с., определенное по правилу правой руки, будет обратным току I . Назовем ее обратной э.д.с. $E_{\text{обр}}$. Величина $E_{\text{обр}}$ согласно закону электромагнитной индукции будет равна

$$E_{\text{обр}} = Blv.$$

По второму закону Кирхгофа, для замкнутой цепи имеем

$$U - E_{\text{обр}} = Ir$$

и

$$U = E_{\text{обр}} + Ir, \quad (б)$$

откуда ток в цепи

$$I = \frac{U - E_{\text{обр}}}{r} \quad (в)$$

Сравнивая выражения (а) и (в), видим, что в проводнике, движущемся в магнитном поле при одних и тех же значениях U и l , ток будет меньше, чем в неподвижном проводнике.

Умножая почленно выражение (б) на I , получим

$$UI = E_{обp} I + I^2 r.$$

Так как $E_{обp} = Blv$, то

$$UI = Blv I + I^2 r.$$

Учитывая, что $Blv = F$ и $Fv = P_{мех}$, имеем

$$UI = Fv + I^2 r$$

Или

$$P_{эл} = P_{мех} + \Delta P$$

Последнее выражение показывает, что при движении проводника с током в магнитном поле мощность источника напряжения преобразуется в механическую мощность и частично в тепловую. Аналогичный процесс преобразования электрической энергии в механическую происходит в электрических двигателях.

Рассмотренные выше примеры показывают, что электрическая машина обратима, т. е. может работать как генератор и как двигатель.

Правило Ленца

Правило Ленца, может быть сформулировано так: *направление индуктированной э. д. с. всегда таково, что вызванный ею ток и его магнитное поле имеют такое направление, что стремятся препятствовать причине, порождающей эту индуктированную э. д. с.*

С учетом этого правила можно закон электромагнитной индукции выразить более общей формулой, позволяющей определить не только величину, но и направление индуктированной э. д. с:

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Выражение $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ представляет собой среднюю скорость изменения магнитного потока по времени. Чем меньше промежуток времени Δt , тем меньше вышеуказанная э. д. с. отличается от ее действительного значения в данный момент времени, Знак минус, стоящий перед выражением $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$, определяет направление индуктированной э.д.с, т. е. учитывает правило Ленца.

При увеличении магнитного потока выражение $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ будет положительным, а э.д.с. - отрицательной. В этом и заключается правило Ленца: э.д. с. и созданный ею ток противодействуют причине, которая их вызвала.

При равномерном изменении во времени магнитного потока выражение $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ будет постоянно. Тогда абсолютное значение э. д. с. в проводнике будет равно

$$e = \frac{\Phi}{t}$$

Если катушка состоит из w витков, соединенных между собой последовательно, то индуцированная э. д. с. в ней равняется сумме э. д. с., индуцированных в отдельных витках:

$$e = -w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Произведение числа витков катушки на сцепленный с ними магнитный поток называется потокосцеплением катушки и обозначается буквой Ψ . По этому закон электромагнитной индукции можно записать и в другой форме:

$$e = - \frac{\Delta \Psi}{\Delta t}$$

Самоиндукция

В цепях электрического тока часто наблюдается особый вид электромагнитной индукции, называемой самоиндукцией. Рассмотрим подробнее это явление. Ранее было выяснено, что при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего данный контур, в последнем индуцируется э. д. с.

$$e = -w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Это будет справедливо и для того случая, когда проводниковый контур будет пересекаться своим собственным магнитным потоком.

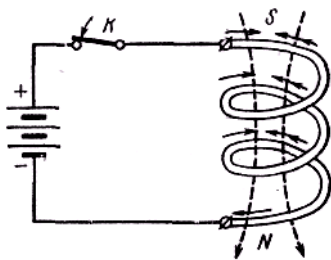


Рис 88. Включение катушки к источнику с постоянной ЭДС

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из катушки, источника тока и ключа K (рис. 88). При разомкнутом ключе тока в цепи нет. Магнитное поле катушки отсутствует. При замыкании ключа в цепи начинает проходить ток, создающий магнитный поток внутри катушки. Направление тока в витках катушки показано одинарной стрелкой. Появившийся магнитный поток катушки, увеличиваясь, будет пересекать витки катушки и согласно закону электромагнитной индукции в витках при этом возникает индуцированная э.д.с. Это явление называется самоиндукцией, а э.д.с., возникающая в результате самоиндукции, называется э.д.с. самоиндукции и обозначается e_L . Величина э.д.с. самоиндукции определяется тем же уравнением

$$e_L = -w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Знак минус, стоящий в правой части уравнения, говорит о направлении индуцированной э.д.с, потому что в нем отображено правило Ленца.

Необходимо заметить, что появление э.д.с. самоиндукции в катушке будет происходить не только в моменты включения или отключения цепи, но и при всяком изменении тока в цепи катушки.

Индуктивность

Магнитный поток, создаваемый током какого-либо витка при отсутствии намагничивающих сред (например, в воздухе), пропорционален величине тока:

$$\Phi = LI$$

где L - коэффициент пропорциональности, называемый **индуктивностью**.

Единица измерения индуктивности –

генри (Гн): 1 Гн;

миллигенри (мГн) = 10^{-3} ;

микrogenри (мкГн) = 10^{-6} .

Индуктивность катушек зависит от числа витков, размера и формы катушек.

Цепями с большой индуктивностью являются обмотки генераторов, электродвигателей, трансформаторов, индукционных катушек и т. п. Значительно меньшей индуктивностью обладают прямолинейные проводники.

Пусть мы имеем контур, состоящий из одного витка. В этом случае величина э.д.с. самоиндукции будет

$$e_L = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Если ток в контуре изменился на Δi , то магнитный поток изменится на величину $\Delta \Phi$:

$$\Delta \Phi = L \Delta i.$$

Величина э. д. с. самоиндукции, которая возникнет в контуре, будет

$$e_L = - \frac{L \Delta i}{\Delta t}$$

Последнее выражение показывает, что величина э. д. с. самоиндукции зависит от индуктивности контура и скорости изменения тока в контуре. Заменив буквенные выражения единичными величинами, получим

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Гн} \frac{1 \text{ А}}{1 \text{ с}}$$

Отсюда можно дать определение единицы индуктивности - *генри*: *индуктивностью в 1 генри обладает электрическая цепь, в которой при скорости изменения тока на 1 ампер в 1 секунду возникает э. д. с. самоиндукции, равная 1 вольту.*

Отдельные витки катушки в общем случае могут пронизываться различными магнитными потоками, поэтому общая э. д. с. катушки будет равна сумме э. д. с. отдельных витков:

$$e = - \left(\frac{\Delta \Phi_1}{\Delta t} + \frac{\Delta \Phi_2}{\Delta t} + \dots + \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right)$$

Сумма магнитных потоков, сцепленных со всеми витками катушки, называется потокосцеплением и обозначается буквой Ψ :

$$\Psi = \omega \Phi$$

Поэтому выражение индуктивности катушки, состоящей из ω витков, в отличие от индуктивности контура с $\omega = 1$ будет

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

Определим индуктивность кольцевой катушки.

Выше нами было найдено выражение для магнитного потока кольцевой катушки:

$$\Phi = \frac{I\omega}{R_M} = \mu_a \frac{I\omega}{l} S$$

Так как магнитный поток такой катушки сцеплен со всеми витками, то

$$\Psi = \omega \Phi = \frac{I\omega^2}{R_M} = \mu_a \frac{I\omega^2}{l} S$$

откуда

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\omega^2}{R_M} = \mu_a \frac{\omega^2}{l} S$$

С достаточной для практики точностью ту же самую формулу можно применять для определения индуктивности цилиндрической катушки (соленоида).

Задачи

1. В равномерном магнитном поле, индукция которого равна 6000 Гс, перемещается проводник под углом 30° к направлению поля. Длина проводника 50 см. Скорость движения его 2,5 м/с. Определить величину индуктированной э. д. с.
2. Определить величину индуктированной э. д. с. в проводнике предыдущей задачи, если проводник перемещается перпендикулярно направлению магнитного поля.
3. Магнитный поток $0,6 \cdot 10^6$ мкс, пронизывающий катушку, состоящую из 200 витков, равномерно уменьшается до нуля за 0,05 с. Определить величину э. д. с, индуктированной в катушке.
4. В катушке за 0,01 с ток равномерно изменился на 200 А. Определить величину э. д. с. самоиндукции, если индуктивность катушки 0,05 Гн.
5. Определить индуктивность катушки, состоящей из 100 витков, если при равномерном изменении тока на 20 А магнитный поток изменился за то же время на 0,6 Вб.
6. Определить индуктивность цилиндрической катушки, которая имеет длину 20 см, диаметр 5 см и число витков 200.
7. Самолет с размахом крыльев 31,7 м летит горизонтально со скоростью 400 км/ч. Определить разность потенциалов на концах крыльев, если вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли $5 \cdot 10^{-5}$ Тл.
8. Какой величины ЭДС самоиндукции возбуждается в обмотке электромагнита с индуктивностью 0,4 Гн при равномерном изменении силы тока в ней на 5 А за 0,02 с?
9. В магнитном поле с индукцией 0,3 Тл подвешен на тонких нитях проводник массой 20 г и длиной 10 см. На какой угол от вертикали отклонится нить, если по проводнику пропустить ток силой 3 А?
10. Протон, влетев в магнитное поле со скоростью 100 км/с, описал окружность радиусом 30 см. Определить индукцию магнитного поля. $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

11. Из тонкого провода сделано замкнутое кольцо. Сопротивление провода 0,02 Ом. При перемещении кольца в магнитном поле магнитный поток через кольцо изменился на $6 \cdot 10^{-3}$ Вб. Какой за это время прошел заряд через поперечное сечение проводника?

12. Электрон, пройдя из состояния покоя разность потенциалов 220 В, попадает в однородное магнитное поле с индукцией $5 \cdot 10^{-3}$ Тл и движется по круговой траектории радиусом

13. Рамка, содержащая 25 витков, находится в переменном магнитном поле. Определить ЭДС индукции, возникающую в рамке при изменении магнитного потока в ней от 0,098 Вб до 0,013 Вб за 0,16 с.

14. Какая сила действует на проводник длиной 20 см в однородном магнитном поле с индукцией 2 Тл, если сила тока в проводнике 40 А, а угол между направлением тока и направлением поля 45° ?

15. В однородном магнитном поле с индукцией 0,5 Тл расположен горизонтально проводник длиной 0,2 м и массой 20 г. Линии индукции поля перпендикулярны проводнику. Какой ток должен идти через проводник, чтобы он висел в магнитном поле?

16. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией $4 \cdot 10^{-6}$ Тл по окружности радиусом 6 см. Определить скорость движения электрона. $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

17. Протон движется по окружности в однородном магнитном поле с индукцией $1,256 \cdot 10^{-6}$ Тл в плоскости, перпендикулярной к силовым линиям. Чему равен период вращения протона в магнитном поле? $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

18. Прямолинейный проводник массой 3 кг, по которому протекает ток 5 А, поднимается вертикально вверх с ускорением 5 м/с^2 в однородном магнитном поле с индукцией 3 Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определить длину проводника.

Вопросы для повторения

1. Что называется электромагнитной индукцией?
2. В каких случаях возникает индуктированная э. д. с?
3. От чего зависит направление индуктированной э. д. с?
4. Как определить направление индуктированной э. д. с. в проводнике?
5. От чего зависит величина индуктированной э. д. с. в проводнике?
6. Объясните принцип действия генератора постоянного тока.
7. Как читается правило Ленца?
8. Что такое взаимная индукция?
9. Объясните принцип действия вариометра.
10. Объясните принцип действия трансформатора.
11. Что такое вихревые токи и какие меры принимают для их уменьшения?
12. Что называется самоиндукцией?

13. Как проявляет себя самоиндукция в цепях постоянного тока?

Практическое занятие №4

Тема: «Расчёт RC-, RL-, RLC-цепей переменного тока при последовательном и параллельном соединении. Резонанса токов и напряжений. Расчёт коэффициента мощности «cos φ».

Получение переменного тока

В начальной стадии развития электротехники применяли исключительно постоянный ток. В настоящее время преимущественное распространение получил переменный ток.

Постоянный ток, необходимый в промышленности на электрифицированном транспорте, в электросвязи и т. д., в большинстве случаев получают путем выпрямления переменного тока. Преимуществами переменного тока являются: возможность трансформации и передачи на далекие расстояния, более простое устройство генераторов переменного тока, более простые в устройстве и надежные в эксплуатации электродвигатели переменного тока и т. д.

Рассмотрим принцип получения переменного тока в результате преобразования механической энергии в электрическую.

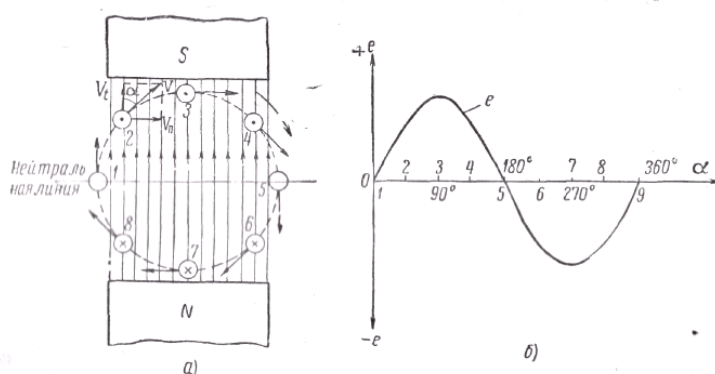


Рис.89 Получение переменной ЭДС: а) – вращение проводника в однородном магнитном поле б) – график изменения переменной ЭДС

Пусть имеется однородное магнитное поле, образованное между полюсами N - S электромагнита (рис. 89, а). Внутри поля под действием посторонней силы вращается по окружности в сторону движения часовой стрелки металлический прямолинейный проводник.

Как известно, пересечение проводником магнитных линий приведет к появлению в проводнике индуктированной э. д. с.

Величина этой Э. Д. С, как было указано ранее, зависит от величины магнитной индукции B , активной длины проводника l , скорости пересечения проводником магнитных линий v и синуса угла α между направлением движения проводника и направлением магнитного поля:

$$e = Blv \sin \alpha.$$

Разложим окружную скорость и на две составляющие - нормальную и тангенциальную по отношению к направлению магнитной индукции B . Нормальная составляющая скорости v_n обуславливает наводимую Э.Д.С. индукции и равна

$$v_n = v \sin \alpha.$$

Тангенциальная составляющая скорости v_n не принимает участия в создании индуктированной э. д. с. и равна

$$v_t = v \cos \alpha;$$

при $\alpha = 90^\circ$ нормальная составляющая скорости $v_n = v \sin \alpha = v \sin 90^\circ = v$,

т. е. в этом случае нормальная составляющая скорости имеет максимальное значение. Такое же значение имеет в этот момент величина индуктированной э. д. с. в проводнике

$$e = Blv = E_m,$$

откуда общее выражение для э. д. с. в проводнике будет $e = E_m \sin \alpha$, или $e \equiv \sin \alpha$.

При движении проводник будет занимать различные положения. На чертеже положения проводника даны через каждые 45° угла поворота. Рассматривая отдельные положения проводника, мы видим, что угол пересечения α меняется и, кроме того, при переходе проводника через нейтральную линию направление индуктированной Э. Д. С, определяемое по правилу правой руки, также меняется.

За один полный оборот проводника Э. Д. С. в нем сначала увеличивается от нуля до максимального значения ($+E_m$), затем уменьшается до нуля и, изменив свое направление, вновь увеличивается до максимального значения ($-E_m$) и вновь уменьшается до нуля. При дальнейшем движении проводника указанные изменения э. д. с. будут повторяться.

Основные понятия и определения, относящиеся к переменным токам

Рассматривая процесс получения переменного тока, мы убедились, что переменная ЭД.С. и переменный ток периодически меняют свои направления и величину. Значение переменной величины (тока, напряжения э.д.с.) в рассматриваемый момент времени называется мгновенным значением и обозначается малой буквой (i - ток, u - напряжение, e - э. д. с.).

Наибольшее из мгновенных значений переменной величины называется ее максимальным, или амплитудным, значением и обозначается большой буквой с индексом m , например I_m , U_m , E_m . Промежуток времени, по истечении которого изменения переменной величины (э. д. с, напряжения или тока) повторяются, называется периодом и обозначается буквой T . Период измеряется в секундах.

Число Периодов в единицу времени (в секунду) называется частотой переменного тока и обозначается буквой f . Единицей «частоты служит герц (Гц; Hz). 1 герц равен 1 периоду в секунду. В технике применяют переменные токи различной частоты. Стандартной частотой тока в РФ и других европейских странах считается частота 50 гц. Для высокочастотных электрических печей применяют переменные токи частотой несколько тысяч и десятков тысяч герц (1000, 2500 и 8000 Гц от машинных генераторов и 150-250 Гц от ламповых генераторов). Для диэлектрического нагрева пластмасс, древесины, стекла, пищевых продуктов и других полупроводниковых и диэлектрических материалов применяют высокочастотные установки частотой 20-25 мГц.

На линиях телефонной связи употребляют токи частотой порядка сотен и тысяч герц. Токи частотой несколько миллионов и миллиардов герц применяют в радиотехнике.

Частота переменного тока измеряется приборами-частотомерами. Между периодом и частотой существует следующая зависимость

$$T = \frac{1}{f}; \quad f = \frac{1}{T}$$

Пример 38. Определить период тока, если частота его 50 гц:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с.}$$

Пример 39. Найти частоту тока, если период равен $5 \cdot 10^{-8}$ с:

$$f = \frac{1}{T} = 20 \cdot 10^6 \text{ Гц} = 20 \cdot 10^3 \text{ кГц (килогерц)} = 20 \text{ мГц (мегагерц)}.$$

Графическое изображение синусоидальных переменных величин

Практика остановила свой выбор на синусоидальных изменениях переменных электрических величин. В дальнейшем, говоря о переменном токе, э. д. с, напряжении и магнитном потоке, мы будем считать их изменяющимися по закону синуса.

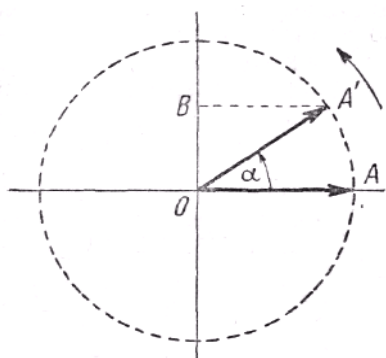


Рис.90 Вращение вектора вокруг оси

Пусть мы имеем радиус-вектор ОА (рис. 90) произвольной длины. Будем вращать с постоянной скоростью вектор вокруг точки О против часовой стрелки. Конец вектора будет описывать окружность, а угол α , на который поворачивается вектор, будет меняться с течением времени.

Угловая скорость, или угловая частота ω (омега), вращения равна углу поворота вектора в единицу времени:

$$\omega = \frac{\alpha}{t}.$$

Следовательно, угол поворота вектора

$$\alpha = \omega t.$$

Часто вместо градуса пользуются другой единицей измерения угла - радианом. Радианом называется угол, дуга которого равна радиусу. Так как длина окружности $l = 2\pi R$, то полному углу 360° соответствует $\frac{2\pi R}{R} = 2\pi$ радиан.

За один оборот радиус-вектор ОА будет иметь один период вращения продолжительностью Т сек.

Угловая частота в этом случае выразится так:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$$

Так как $\frac{1}{T} = f$ то $\omega = 2\pi f$,

Угол поворота радиуса-вектора a от начального положения будет равен

$$\alpha = \omega t = 2\pi f t$$

Угол α называется фазным углом, или фазой. Проекция вектора OA на вертикальный диаметр равна произведению величины вектора на синус фазного угла, т. е.

$$OB = OA \sin \alpha.$$

Следовательно, проекция вращающегося вектора OA на вертикальный диаметр изменяется по закону синуса. Если длина вектора будет A_m , то мгновенное значение проекции a равно

$$a = A_m \sin \alpha = A_m \sin \omega t;$$

$$\text{при } \alpha = 0^\circ \text{ величина } a = A_m \sin 0^\circ = 0;$$

$$\text{при } \alpha = 90^\circ \text{ величина } a = A_m \sin 90^\circ = A_m.$$

В последнем случае мгновенное значение проекции равно ее амплитудному или максимальному значению.

Задаваясь величиной фазного угла и проектируя вектор A_m на вертикальный диаметр, будем получать мгновенное значение синусоидальной величины.

Таким образом, синусоидальная величина изображается вращающимся вектором; длина вектора в масштабе выражает амплитуду синусоиды.

Проведем горизонтальную ось, на которой отложим фазные углы, прохо-

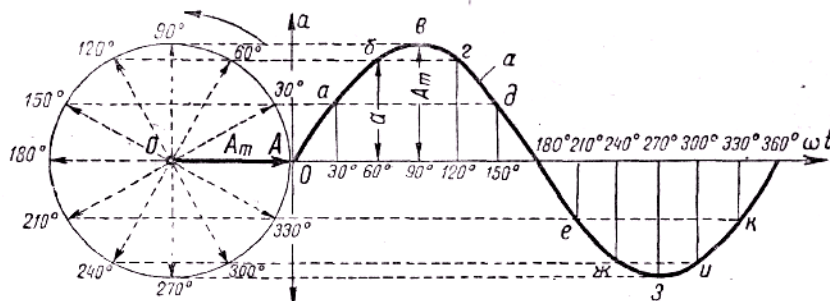


Рис.91 Получение синусоиды путём вращения вектора

димые вектором при его вращении (рис. 91). Откладываем затем вертикальные отрезки, равные соответствующим значениям проекции вращающегося вектора.

Соединяя концы вертикальных отрез-

ков плавной кривой, получим знакомую нам кривую - синусоиду.

Способ изображения синусоидально изменяющихся - величин с помощью векторов определенной длины и определенным образом расположенных друг относительно друга называется векторной диаграммой.

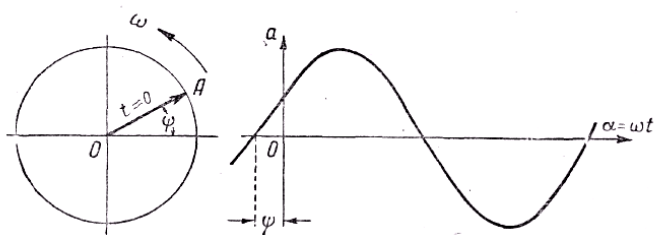


Рис.92 Построение синусоиды при наличии начальной фазы

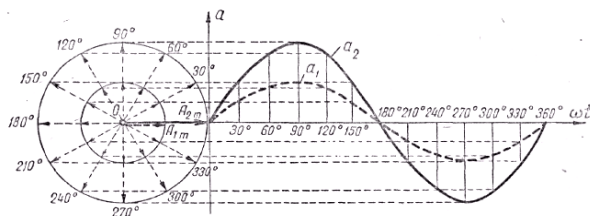


Рис.93 Построение двух синусоид путём вращения двух совпадающих векторов

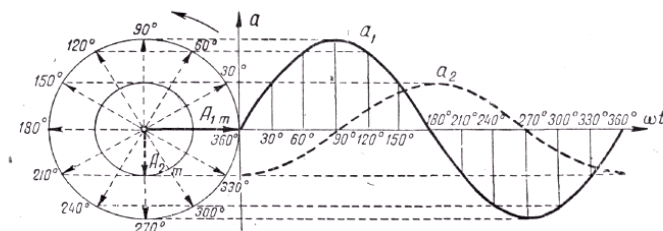


Рис.94 Построение двух синусоид сдвинутых на 90° путём вращения двух векторов, расположенных под углом 90°

зой.

Векторная диаграмма и график для этого случая даны на рис. 92.

Мы не внесем ничего нового, если будем вращать одновременно и с одинаковой скоростью ω два вектора, совпадающие по направлению. В определенный момент времени оба вектора будут повернуты на один и тот же фазный угол. Поэтому как сами векторы, так и переменные величины, которые они выражают, называют совпадающими по фазе. Векторная диаграмма и график двух величин, совпадающих по фазе, даны на рис. 93.

Уравнения для таких величин запишутся так;

$$a_1 = A_{1m} \sin \omega t; a_2 = A_{2m} \sin \omega t,$$

Если векторы сдвинуть один относительно другого на определенный угол α и вращать их вокруг точки О, то мы получим две синусоидальные кривые, сдвинутые, как говорят, по фазе между собой на тот же угол α . На рис. 94 показано построение двух синусоид, сдвинутых по фазе на угол α , равный 90° . В этом случае о кривой a_1 говорят, что она опережает кривую a_2 по фазе на 90° , или, наоборот, кривая a_2 отстает по фазе от кривой a_1 на 90° .

Сложение и вычитание синусоидальных величин

При изучении явлений, происходящих в цепях переменного тока, нам придется часто заниматься сложением и вычитанием синусоидальных величин (токов, напряжений и др.).

Та же зависимость может быть выражена в виде синусоидальных кривых.

Таким образом, переменную синусоидальную величину можно представить тремя способами: уравнением, векторной диаграммой и графиком синусоиды.

Если радиус - вектор в начальный момент отсчета времени ($t=0$) составляет некоторый угол ϕ с горизонтальной осью то в этом случае мгновенное значение переменной величины будет:

$$a = A_m \sin (\omega t + \phi)-$$

Угол ϕ (пси) называется начальным фазным углом, или начальной фазой.

Рассмотрим сложение двух синусоидальных величин, заданных уравнениями:

$$a_1 = A_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$a_2 = A_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2)$$

Их сумма будет иметь величину

$$a = a_1 + a_2 = A_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + A_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2).$$

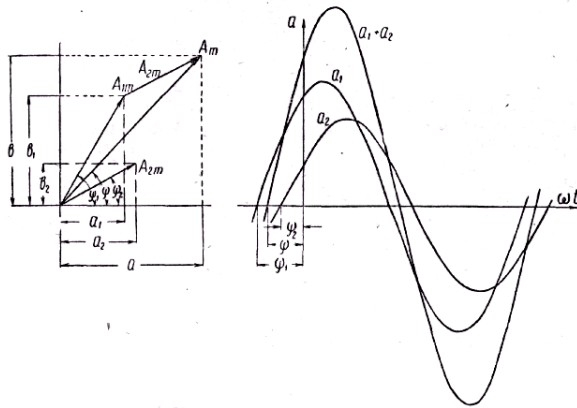


Рис.95 сложение двух синусоидальных величин

Произведя необходимые математические преобразования, получим окончательно

$$a = A_m \sin(\omega t + \varphi)$$

Отсюда видно, что суммой двух синусоид одинакового периода является также синусоида с амплитудой A_m и начальной фазой φ .

Сложение синусоидальных величин проще и нагляднее представить на векторной диаграмме, показанной на рис. 95

слева. Из диаграммы следует:

$$a_1 = A_m \cos \varphi_1; a_2 = A_{2m} \cos \varphi_2;$$

$$a = a_1 + a_2,$$

$$b_1 = A_{1m} \sin \varphi_1; b_2 = A_{2m} \sin \varphi_2,$$

$$b = b_1 + b_2.$$

Величина результирующего вектора A_m , равная геометрической сумме векторов A_{1m} и A_{2m} , составляет:

$$A = \sqrt{a^2 + b^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{a}$$

На рис. 95 справа дано графическое сложение двух синусоид. Любое мгновенное значение результирующей синусоиды равно сумме мгновенных значений слагаемых синусоид для каждого момента времени.

полученные выводы можно применить для сложения трех и больше синусоидальных величин.

Для того чтобы отличить действия с векторами, изображающими синусоидальные величины, мы в дальнейшем будем ставить черту

над буквенным обозначением вектора. Например, сложение двух векторов A_1 и A_2 будем записывать так:

$$A = A_1 + A_2.$$

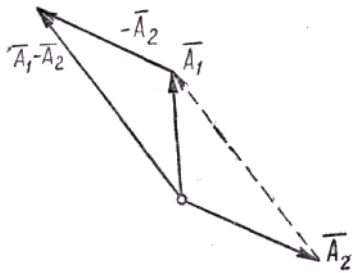


Рис.96 Вычитание векторов

Рассмотрим теперь, как производится вычитание векторных величин. Пусть векторы A_1 и A_2 изображают какие-то синусоидальные величины и нам нужно из вектора A_1 вычесть вектор A_2 (рис. 96). Вычитание векторов всегда можно заменить сложением уменьшаемого вектора с вектором, равным и противоположным вычитаемому вектору, т. е.

$$A_1 - A_2 = A_1 + (-A_2)$$

Зависимость частоты генератора переменного тока от числа пар полюсов и скорости вращения ротора

При рассмотрении вопроса о получении переменного тока указывалось, что за один оборот двухполюсного ротора индуктированная в проводниках обмотки генератора э. д. с. имела один период. Если ротор генератора делает, например, 5 об/сек, то э. д. с. будет иметь 5 пер/сек или частота тока генератора будет равна 5 Гц. Следовательно, число оборотов в секунду ротора генератора численно равно частоте тока.

Частота тока f выражается в этом случае следующим соотношением:

$$f = \frac{n}{60}$$

где n - число оборотов ротора в минуту.

Для получения от генератора стандартной частоты тока - 50 Гц - ротор должен делать 3000 об/мин, действительно,

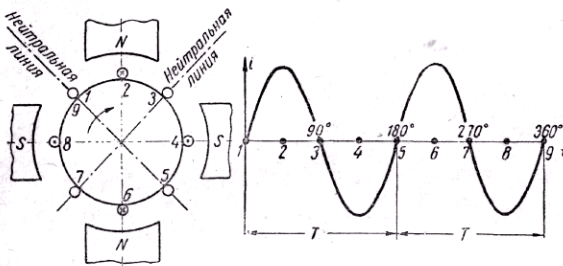


Рис.97 Изменение переменного тока в проводнике ротора четырёхполюсного генератора

$$f = \frac{n}{60} = \frac{3000}{60} = 50 \text{ Гц}$$

Однако наши рассуждения были справедливы только для двухполюсного генератора, т. е. для машины с одной парой полюсов: $p = 1$.

Если машина четырехполюсная, т. е. число пар полюсов равно двум: $p = 2$ (рис. 97), то один полный период изменения э. д. с. и тока будет иметь место за пол-оборота ротора (положения 1-5 проводника на чертеже). За второй полуоборот ротора ток будет иметь еще один период. Следовательно, за один оборот ротора четырех полюсной машины ток в проводнике имеет два периода. В шестиполюсной машине ($p = 3$) ток в проводнике за один оборот ротора будет иметь три периода.

Таким образом, для машин, имеющих p пар полюсов, частота тока при n об/мин или $\frac{n}{60}$ об/сек будет в p раз больше, чем для двухполюсной машины, т. е.

$$f = \frac{pn}{60}$$

Отсюда формула для определения скорости вращения ротора будет иметь следующий вид:

$$n = \frac{60 f}{p}$$

Пример 40. Определить частоту переменного тока, получаемого от генератора с восемью полюсами ($p = 4$), скорость вращения ротора которого $n = 750$ об/мин. Подставляя в формулу для определения частоты тока значение p и n , получим

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{4 \times 750}{60} = 50 \text{ Гц}$$

Пример 41. Определить скорость вращения ротора двадцатиполюсного генератора ($p = 10$), если частотомер показал частоту тока $f = 25$ Гц. Подставляя в формулу для определения числа оборотов ротора n значения p и f , получим

$$n = \frac{60 f}{p} = \frac{60 \times 25}{10} = 150 \text{ об /мин.}$$

Пример 5. Ротор генератора, приводимого в движение водяной турбиной, делает 75 об/мин. Определить число полюсов генератора, если частота его тока 50 Гц:

$$p = \frac{60 f}{n} = \frac{60 \times 50}{75} = 40 \text{ пар.}$$

Следовательно, генератор имеет 80 полюсов.

Действующее значение переменного тока

Переменный синусоидальный ток в течение периода имеет различные мгновенные значения. Действия тока не определяются ни амплитудным, ни мгновенным значениями. Для оценки действия, производимого переменным током, мы сравним его действия с тепловым эффектом постоянного тока.

Мощность P постоянного тока I , проходящего через сопротивление r , будет

$$P = I^2 r$$

Мощность переменного тока выразится как среднее значение мгновенной мощности $i^2 r$ за целый период или среднее значение i^2 , умноженное на r

$$P = (i^2)_{cp} r.$$

Чтобы переменный ток был эквивалентен постоянному току по своему тепловому действию, нужно, чтобы их мощности были одинаковы.

Приравнявая мощность постоянного тока и мощность при переменном токе, имеем $I^2 r = (i^2)_{cp} r$

Откуда

$$I = \sqrt{(i^2)_{cp}}$$

Величина I называется действующим значением переменного тока.

Среднее значение синусоидального тока $(i^2)_{cp}$ определим следующим образом:

$$i^2 = (I_m \sin \omega t)^2 = I_m^2 \sin^2 \omega t = I_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = \frac{I_m^2}{2} - \frac{I_m^2}{2} \cos 2\omega t$$

Среднее значение любой синусоидальной величины за период равно нулю и поэтому среднее за период значение от $\cos 2\omega t$ тоже равно нулю.

Следовательно,

$$(i^2)_{cp} = \frac{I_m^2}{2}$$

$$I = \sqrt{(i^2)_{cp}} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

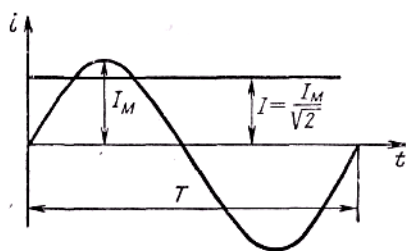


Рис.98 Действующее значение синусоидального переменного тока

Отсюда получаем, что действующее значение синусоидального тока (рис. 98)

Аналогично зависимость между действующим и амплитудным значениями для напряжения U и E имеет вид

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

Действующие значения переменных величин обозначаются прописными буквами без индексов (I , U , E).

На основании изложенного выше можно сказать, что *действующее значение переменного тока равно такому постоянному току, который, проходя через то же сопротивление, за то же время выделяет такое же количество тепла, что и переменный ток.*

Электроизмерительные приборы (амперметры, вольтметры), включенные в цепь переменного тока, показывают действующие значения тока или напряжения.

При построении векторных диаграмм удобнее откладывать не амплитудные, а действующие значения векторов. Для этого длины всех векторов уменьшают в $\sqrt{2}$ раз. От этого расположение векторов на диаграмме также не изменится.

Среднее значение переменного тока

Среднее значение переменной синусоидальной величины за период равно

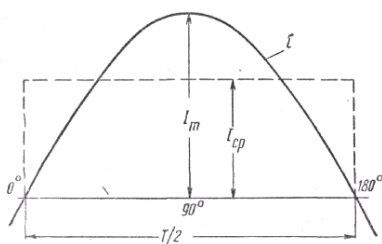


Рис.99 Среднее значение переменного тока

нулю. Поэтому, когда говорят о среднем значении синусоидальной величины, имеют в виду среднее значение за полпериода. На рис. 99 изображена кривая изменения переменного тока за полпериода.

Построим прямоугольник с основанием $T/2$ и площадью, равной площади, заключенной между кривой и горизонтальной осью.

Высота прямоугольника будет представлять среднее значение тока за полпериода.

С помощью высшей математики нетрудно получить следующую зависимость между средним и амплитудным значениями переменного синусоидального тока:

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

Такая же зависимость существует между средними и амплитудными значениями напряжения и э. д. с:

$$U_{cp} = 0,637 U_m; E_{cp} = 0,637 E_m.$$

Отношение действующего значения переменной величины к ее среднему значению называется коэффициентом формы кривой и обозначается буквой k_f .

Для синусоидальных величин этот коэффициент равен

$$k_f = \frac{I}{I_{cp}} = \frac{I_m \pi}{\sqrt{2} \times 2 I_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

Отношение амплитудного значения переменной величины к ее действующему значению называется коэффициентом амплитуды и обозначается буквой k_a .

Для синусоидальных величин этот коэффициент

$$k_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2} = 1,41$$

Цепь переменного тока с активным сопротивлением

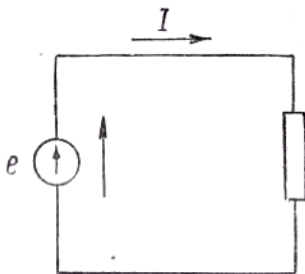


Рис.100 Цепь содержащая активное сопротивление

Рассмотрим цепь (рис. 100), состоящую из сопротивления r . Влиянием индуктивности и емкости для простоты пренебрегаем. К зажимам цепи приложено синусоидальное напряжение

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

По закону Ома, мгновенное значение тока будет равно:

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

или, переходя к действующим значениям, получаем •

$$I_m = \frac{U_m}{r}$$

т. е.

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

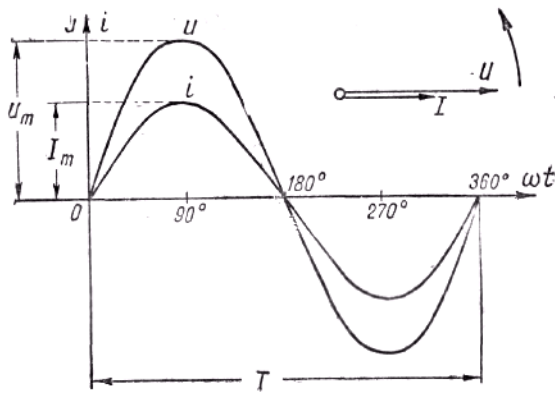


Рис.101 Графики и векторная диаграмма для цепи переменного тока содержащей активное сопротивление

Как следует из последнего выражения, вид закона Ома для цепи переменного тока, содержащей сопротивление r , тот же, что для цепи постоянного тока. Кроме того, из закона Ома видна пропорциональность между мгновенным значением напряжения и мгновенным значением тока. Отсюда следует, что в цепи переменного тока, содержащей сопротивление r , напряжение и ток совпадают по фазе. На рис. 101 даны кривые

напряжения и тока и векторная диаграмма для рассматриваемой цепи, причем длины векторов обозначают действующие значения напряжения и тока.

Сопротивление проводников переменному току несколько больше их сопротивления постоянному току. Это объясняется тем, что при переменном токе наблюдается неравномерное распределение тока по сечению проводника, так что плотность тока будет возрастать от оси к поверхности проводника. Это явление называется поверхностным эффектом. Неравномерная плотность тока приводит к увеличению сопротивления проводника. Однако при стандартной частоте 50 Гц, небольшом сечении и медных или алюминиевых проводах явление поверхностного эффекта сказывается слабо. При высокой частоте, большом сечении и стальных проводах оно значительно.

Поэтому сопротивление проводников переменному току называют активным в отличие от сопротивления, которое оказал бы этот проводник при постоянном токе. Обозначается оно также буквой r .

В цепи, представленной на рис. 100, приложенное внешнее напряжение компенсирует падение напряжения в сопротивлении r , которое называется активным падением напряжения и обозначается U_a :

$$U_a = Ir.$$

Мгновенное значение мощности в рассматриваемой цепи равно произведению мгновенных значений напряжения и тока:

$$p = ui = i^2 r$$

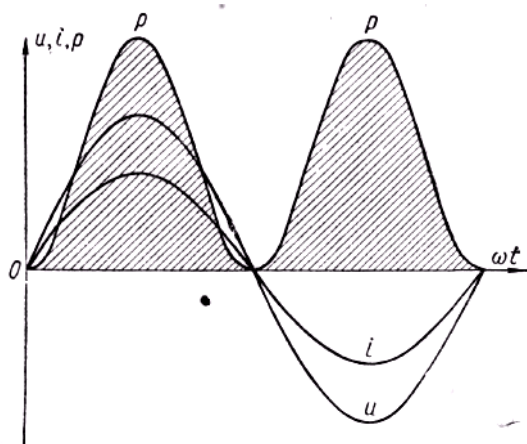


Рис.102 Кривая мгновенной мощности с цепи с активным сопротивлением

На рис. 102 дана кривая мгновенной мощности за один период. Из чертежа видно, что мощность не является постоянной величиной, она пульсирует с двойной частотой K

Среднее за период значение мощности называется активной мощностью, обозначается буквой P и измеряется в ваттах. Для рассматриваемой цепи с активным сопротивлением

$$P = (i^2 r)_{cp} = (i^2)_{cp} r.$$

Так как

$$(i^2)_{cp} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right)^2 = I^2$$

Пульсацией называется изменение численного значения переменной величины при постоянстве ее знака.

т. е. формула мощности для цепи переменного тока с активным сопротивлением такая же, как формула мощности для цепи постоянного тока. Активным сопротивлением обладают все проводники. В цепи переменного тока практически только одним активным сопротивлением обладают нити ламп накаливания, спирали электронагревательных приборов и реостатов, дуговые лампы, специальные бифилярные обмотки и прямолинейные проводники небольшой длины.

Цепь переменного тока с индуктивностью

Как мы видели выше, при включении, выключении и при всяком изменении тока в электрической цепи вследствие пересечения проводника своим же собственным магнитным полем в нем возникает индуцированная э.д.с. Эту э.д.с. мы называли э.д.с. самоиндукции. Э.д.с. самоиндукции, как указывалось, имеет реактивный характер. Так, например, при увеличении тока в цепи э.д.с. самоиндукции будет направлена против э. д. с. источника напряжения и поэтому ток в электрической цепи не может установиться сразу. И наоборот, при уменьшении тока в цепи индуцируется э.д.с. самоиндукции такого направления, что, препятствуя убыванию тока, она поддерживает этот убывающий ток.

Как нам уже известно, э.д.с. самоиндукции зависит от скорости изменения тока в цепи и от индуктивности этой цепи (числа витков, наличия стальных сердечников):

$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

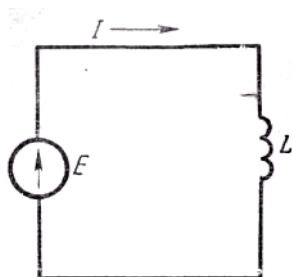


Рис.103 Цепь переменного тока с индуктивностью

В цепи переменного тока э. д. с. самоиндукции возникает и действует непрерывно, так как ток в цепи непрерывно изменяется. На рис. 103 представлена схема цепи переменного тока, содержащей катушку с индуктивностью L без стального сердечника.

Для простоты будем считать сначала, что активное сопротивление катушки r очень мало и им можно пренебречь.

Рассмотрим внимательнее изменение переменного тока за время одного периода. На рис. 104 показана кривая изменения переменного тока.

Первая половина периода разбита на мелкие одинаковые части.

За промежуток времени 0-1 величина тока изменилась от нуля до 1-1'. Прирост величины тока за это время равен a .

За время, обозначенное отрезком 1-2, мгновенная величина тока выросла до 2-2', причем прирост величины тока равен b . В течение времени, обозначенного отрезком 2-3, ток увеличивается до 3-3', прирост тока показывает отрезок b и т. д.

Так, с течением времени переменный ток возрастает до максимума (при 90°). Но, как видно из чертежа, прирост тока делается все меньше и меньше, пока, наконец, при максимальном значении тока этот прирост не станет равным нулю.

При дальнейшем изменении тока от максимума до нуля убыль величины тока становится все больше и больше, пока, наконец, около нулевого значения ток, изменяясь с наибольшей скоростью, не исчезнет, но тут же появляется вновь, протекая в обратном, направлении.

Рассматривая изменение тока в течение периода, мы видим, что с наибольшей скоростью изменяется ток около своих нулевых значений. Около максимальных значений скорость изменения тока падает, а при максимальном значении тока прирост его равен нулю. Таким образом, переменный ток меняется не только по величине и направлению,

но также и по скорости своего, изменения.

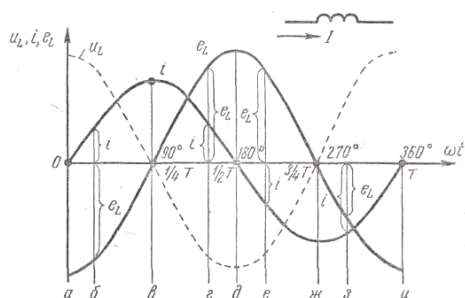


Рис. 139. Э. д. с. самоиндукции в катушке, включенной в цепь переменного тока

Рис.105 ЭДС самоиндукции в катушке включённой в цепь переменного тока

На рисунке 105 видно, что э.д.с. самоиндукции отстает по фазе от тока на 90° , или на $1/4$ периода. Так как магнитный поток совпадает по фазе с током, то можно сказать, что э. д. с, наводимая магнитным потоком, отстает от него по фазе на 90° , или на $1/4$ периода.

Нам уже известно, что две синусоиды, сдвинутые одна относительно другой на 90° , можно изобразить векторами, расположенными под углом 90° (рис. 106).

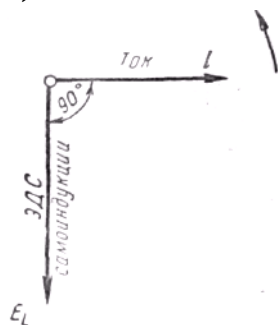


Рис.106 Ток в катушке опережает ЭДС самоиндукции по фазе на 90°

Так как э.д.с. самоиндукции в цепях переменного тока непрерывно противодействует изменениям тока, то, чтобы ток мог протекать по виткам катушки, напряжение сети должно уравнивать э.д.с. самоиндукции. Иными словами, напряжение сети в каждый момент времени должно быть равно и противоположно э.д.с. самоиндукции.

Вектор напряжения сети, равный и противоположный э.д.с. самоиндукции E_L мы обозначим через U (рис. 107). Только при условии, что к зажимам катушки приложено напряжение сети, равное и противоположное э.д.с. самоиндукции, и, стало

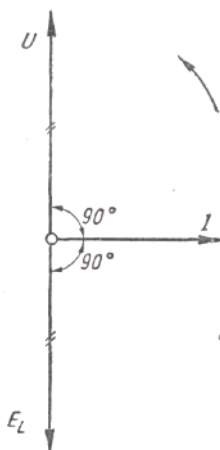


Рис.107 Приложенное к катушке напряжение сети опережает ток на 90° и противоположно ЭДС индукции

быть, это напряжение сети U уравнивает э.д.с. самоиндукции E_L , по катушке может проходить переменный ток I . Но в этом случае напряжение сети U будет опережать по фазе ток I на 90° .

Следовательно, в цепи с индуктивностью ток I отстает от приложенного напряжения U по фазе на $1/4$ периода. На векторной диаграмме такому сдвигу фаз между напряжением U и током I соответствует угол $\alpha = 90^\circ$ или $\frac{\pi}{2}$.

Таким образом, в цепях переменного тока э.д.с. самоиндукции, понижая и действуя непрерывно, вызывает сдвиг фаз между током и напряжением.

Итак отметим, что в цепи переменного тока, когда э. д. с. самоиндукции отсутствует, напряжение сети и ток совпадают по фазе. Индуктивная же нагрузка в цепях переменного тока (обмотки электродвигателей и генераторов, обмотки трансформаторов, индуктивные катушки) всегда вызывает сдвиг фаз между током и напряжением.

Можно показать, что скорость изменения синусоидального тока пропорциональна угловой частоте ω . Следовательно, действующее значение э.д.с. самоиндукции E_L может быть найдено по формуле

$$E_L = \omega LI = 2\pi f LI.$$

Как было отмечено выше, напряжение, приложенное к зажимам цепи, содержащей индуктивность, должно быть по величине равно э. д. с. самоиндукции:

$$U_L = E_L.$$

Поэтому

$$U_L = 2\pi f LI.$$

Обозначая

$$2\pi fLI = X_L, \text{ получим } U_L = X_L I.$$

Формула закона Ома для цепи переменного тока, содержащей индуктивность, имеет вид

Величина X_L называется индуктивным сопротивлением цепи, или реактивным сопротивлением индуктивности, и измеряется в омах. Таким образом, индуктивное сопротивление представляет собой своеобразное препятствие, которое цепь с индуктивностью оказывает изменениям тока в ней. Оно равно произведению индуктивности на угловую частоту:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL.$$

Так как индуктивное сопротивление проводника зависит от частоты переменного тока, то сопротивление катушки, включаемой в цепь токов различной частоты, будет различным.

Например, если имеется катушка с индуктивностью 0,05 Гн, то в цепи тока частотой 50 Гц ее индуктивное сопротивление будет

$$X_{L1} = \omega L = 2\pi f_1 L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,05 = 15,7 \text{ Ом, а в цепи тока частотой 400 Гц}$$

$$X_{L2} = 2\pi f_2 L = 2 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 0,05 = 125,6 \text{ Ом.}$$

Та часть напряжения сети, которая преодолевает (уравновешивает) э.д.с. самоиндукции, называется индуктивным падением напряжения (или реактивной слагающей напряжения):

$$U_L = X_L I$$

Рассмотрим теперь, какая мощность потребляется от источника переменного напряжения, если к зажимам его подключена индуктивность.

На рис. 108 даны кривые мгновенных значений напряжения, тока и мощности для этого случая. Мгновенное значение мощности равно произведению мгновенных значений напряжения и тока:

$$p = ui.$$

Из чертежа видно, что если u и i имеют одинаковые знаки, то кривая p располагается выше оси ωt . Если же u и i имеют разные знаки, то кривая p располагается ниже оси ωt .

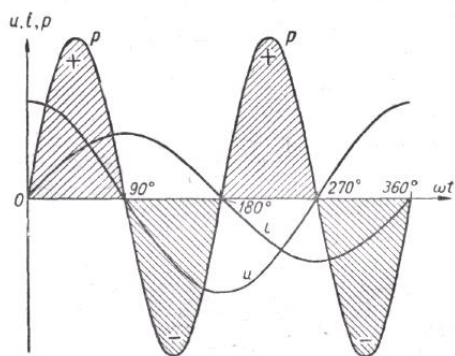


Рис.108 Кривые мгновенных значений напряжения тока и мощности для цепи содержащей индуктивность

В первую четверть периода ток, а вместе с ним и магнитный поток катушки увеличиваются. Катушка потребляет из сети мощность. Площадь, заключенная между кривой p и осью ωt , есть работа (энергия) электрического тока. В первую четверть периода энергия, потребляемая из сети, идет на создание магнитного поля. Вокруг витков катушки (мощность положительная). Количество энергии, запасаемое в магнитном поле за время увеличения тока, можно определить по формуле

$$W = \frac{LI^2}{2}$$

Во вторую четверть периода ток убывает. Э.д.с. самоиндукции, которая в первую четверть периода стремилась препятствовать возрастанию тока, теперь, когда ток начинает уменьшаться, будет препятствовать ему уменьшаться. Сама катушка становится как бы генератором электрической энергии. Она возвращает в сеть энергию, запасенную в ее магнитном поле. Мощность отрицательна, и на рис. 142 кривая p располагается ниже оси ωt .

Во вторую половину периода явление повторяется. Таким образом, между источником переменного напряжения и катушкой, содержащей индуктивность, происходит обмен мощностью. В течение первой и третьей четвертей периода мощность поглощается катушкой, в течение второй и четвертой четвертей мощность возвращается источнику.

В этом случае в среднем расхода энергии не будет, несмотря на то что на зажимах цепи есть напряжение U и в цепи протекает ток I . Следовательно, средняя, или активная, мощность цепи, носящей чисто индуктивный характер, равна нулю.

Из графика, изображенного на рис. 108, видно, что мгновенная мощность цепи с индуктивностью два раза в течение каждого периода (когда $\omega t = 45^\circ$, 135° и т. д.) достигает максимального значения, равного $\frac{U_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} = UI$. Этой величиной принято характеризовать количественно процесс обмена энергией между источником и магнитным полем. Ее называют **реактивной мощностью** и обозначают буквой Q .

Учитывая, что в рассматриваемой цепи $U = I X_L$ получаем следующее выражение для реактивной мощности:

$$Q = I^2 X_L.$$

Цепь переменного тока, содержащая емкость

Если в цепь постоянного тока включить конденсатор (идеальный - без потерь), то в течение очень короткого времени после включения по цепи потечет зарядный ток. После того как конденсатор зарядится до напряжения, равного

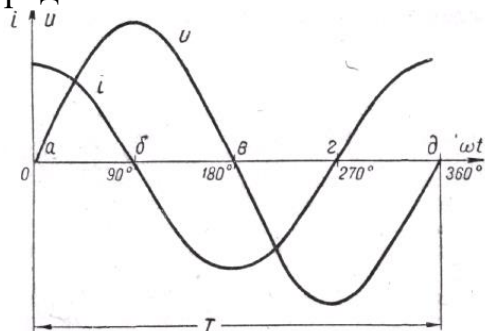


Рис.109 Графики и векторная диаграмма для цепи переменного тока содержащей ёмкость

напряжению источника, кратковременный ток в цепи прекратится. Следовательно, для постоянного тока конденсатор представляет собой разрыв цепи, или, иными словами, бесконечно большое сопротивление. Если же конденсатор включить в цепь переменного тока, то он будет заряжаться попеременно то в од-

ном, то в другом направлении.

При этом в цепи будет проходить переменный ток. Рассмотрим это явление подробнее.

В момент включения напряжение на конденсаторе равно нулю. В течение первой четверти периода, когда напряжение сети будет возрастать (рис. 109), конденсатор будет заряжаться.

По мере накопления зарядов на обкладках конденсатора напряжение конденсатора увеличивается. Когда напряжение сети к концу первой четверти периода достигнет максимального значения U_m напряжение конденсатора также станет равным U_m , заряд конденсатора прекращается и ток в цепи становится равным нулю. Ток в цепи конденсатора можно определить по формуле

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

где Δq - количество электричества, протекающее по цепи за время Δt . Из электростатики известно:

$$q = Cu_c = Cu,$$

где C - емкость конденсатора;

u - напряжение сети;

u_c - напряжение конденсатора.

Окончательно для тока имеем

$$i = C \frac{\Delta u_c}{\Delta t} = C \frac{\Delta u}{\Delta t}$$

Из последнего выражения видно, что, когда $\frac{\Delta u}{\Delta t}$ максимально (положения $a, в, d$), i также максимально.

Когда $\frac{\Delta u}{\Delta t} = 0$ (положения $б, г$ на рис. 109), то i также равно нулю.

Во вторую четверть периода напряжение сети будет уменьшаться, и конденсатор начнет разряжаться. Ток в цепи меняет свое направление на обратное.

В следующую половину периода напряжение сети меняет свое направление и наступает перезаряд конденсатора и затем снова его разряд.

Из рис. 109 видно, что ток i в цепи с емкостью в своих изменениях опережает по фазе напряжение конденсатора на $1/4$ периода, или 90° .

Сравнивая векторные диаграммы цепей с индуктивностью и емкостью, мы видим, что индуктивность и емкость на фазу тока влияют прямо противоположно.

Пользуясь высшей математикой, можно доказать, что ток в цепи с емкостью пропорционален напряжению U_c , приложенному к конденсатору, угловой частоте ω и величине емкости конденсатора C ;

$$I = U_c \omega C = 2\pi f C U_c.$$

Обозначим

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

Величина X_c называется емкостным сопротивлением, или реактивным сопротивлением емкости, и измеряется в омах. Выражение закона Ома для цепи переменного тока, содержащей емкость, имеет вид

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

Та часть напряжения сети, которая приложена к конденсатору, называется емкостным падением напряжения (или реактивной слагающей напряжения) и обозначается U_c :

$$U_c = I X_c.$$

Емкостное сопротивление X_c , так же как индуктивное сопротивление X_L , зависит от частоты переменного тока.

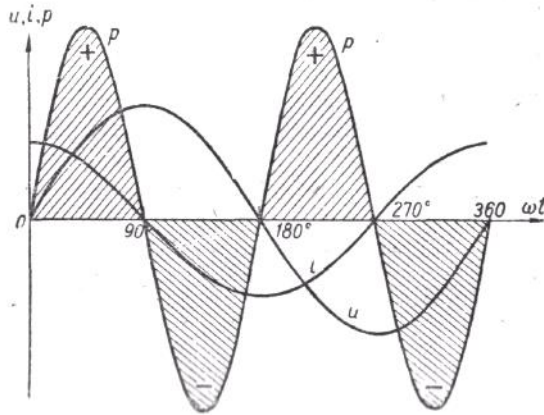


Рис.110 Кривая мгновенной мощности в цепи с ёмкостью

Но если с увеличением частоты индуктивное сопротивление увеличивается, то емкостное сопротивление, наоборот, будет уменьшаться.

Пример 42. Определить сопротивление конденсатора емкостью 5 мкФ при частоте 50 Гц :

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

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 636 \text{ Ом}$$

при частоте 400 Гц :

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 400 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 79,5 \text{ Ом}$$

На рис. 110 показана кривая мгновенной мощности в цепи с емкостью. Из чертежа видно, что в первую четверть периода цепь с емкостью забирает из сети энергию, которая запасается в электрическом поле конденсатора.

Энергию, запасаемую конденсатором к моменту, когда напряжение на нем равно максимальному значению, можно определить по известной формуле

$$W = \frac{CU^2}{2}.$$

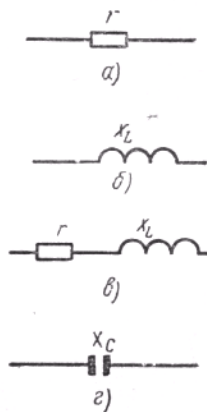


Рис.111 Обозначение сопротивлений в цепях переменного тока

В следующую четверть периода конденсатор разряжается на сеть, отдавая ей ранее запасенную в нем энергию.

За вторую половину периода явление колебаний энергии повторяется. Таким образом, в цепи с емкостью происходит лишь обмен энергией между сетью и конденсатором без ее потерь.

Поэтому средняя за период мощность, или активная мощность, цепи с емкостью равна нулю, как и в цепи с индуктивностью.

Из графика, изображенного на рис. 110, видно, что мгновенная мощность в цепи с емкостью два раза в течение каждого периода (когда $\omega t = 45^\circ, 135^\circ$ и т. д.) достигает максимального значения,

$$\text{равного } \frac{U_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} = UI.$$

Этой величиной принято характеризовать количественно процесс обмена энергии между источником и электрическим полем конденсатора. Ее также называют реактивной мощностью и обозначают буквой Q .

Учитывая, что в рассматриваемой цепи $U = I^2 x_c$, получим следующее выражение для реактивной мощности:

Последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности (R, L)

На схемах цепей переменного тока сопротивления обозначаются, как показано на рис. 111. На практике часто встречаются участки электрической цепи, обладающие как активным, так и индуктивным и емкостным сопротивлениями.

Пусть необходимо определить напряжение сети, которое нужно приложить к зажимам катушки, чтобы по ней мог проходить переменный ток. Ка-

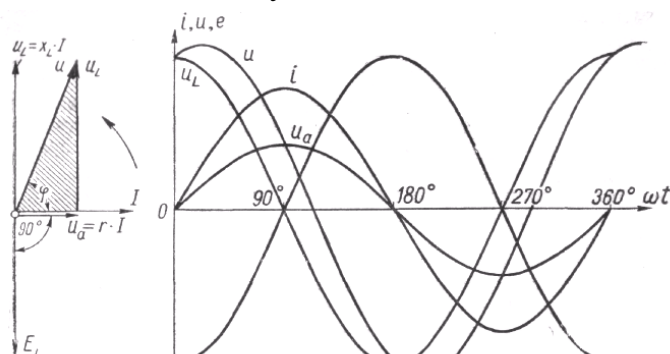


Рис.112 Векторная диаграмма и график для последовательного R, L -соединения

тушка имеет активное и индуктивное сопротивления. Поэтому напряжение сети должно уравновесить активное падение напряжения, а также э. д. с. самоиндукции, возникающую в катушке.

Построим векторную диаграмму и графики для этого случая.

На рис. 112 вектор i обозначает переменный ток катушки. Э.д.с. самоиндукции E_L в катушке отстает по фазе от тока на 90° .

Часть напряжения сети, уравновешивающая э.д.с. самоиндукции, показана вектором U_L который равен и противоположен вектору E_L . Часть напряжения сети, равная падению напряжения в активном сопротивлении, изображена вектором U_R , совпадающим по фазе с током. Напряжение сети должно быть равно геометрической сумме падений напряжения: активного U_R и индуктивного U_L . Геометрическая сумма берется потому, что U_R и U_L на рис. 112 изображаются векторами, а векторы складываются геометрически.

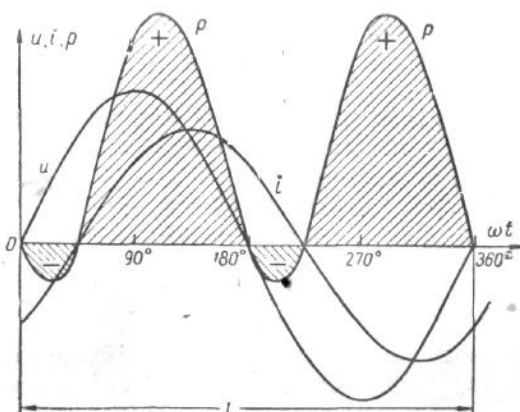


Рис. 113 Графики мгновенной мощности для цепи с последовательным соединением r и L

Оба эти напряжения расположены под углом одно к другому. Поэтому для получения их геометрической суммы необходимо на векторах U_a и U_L построить параллелограмм. Его диагональ (равнодействующая) представляет собой вектор напряжения сети U . Как видно из рис. 112, вектор тока i отстает от вектора напряжения U на угол φ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L}{U_a} = \frac{I x_L}{I r} = \frac{x_L}{r}$$

В катушке, содержащей только индуктивное сопротивление, ток отставал от напряжения сети на угол 90° , а при учете активного сопротивления ток отстает от напряжения сети на угол, меньший, чем 90° . И только когда индуктивность равна нулю, ток в катушке совпадает по фазе с напряжением сети.

Построим график мгновенной мощности для последовательного соединения активного сопротивления и индуктивности (рис. 113).

Из представленного графика видно, что средняя, или активная, мощность не равна нулю, как было в цепи с индуктивностью или емкостью. В этом случае в течение некоторой части периода энергия в цепи расходуется на нагрев сопротивления и образование магнитного поля катушки (мощность положительна). В течение другой части периода энергия возвращается в сеть (мощность отрицательна).

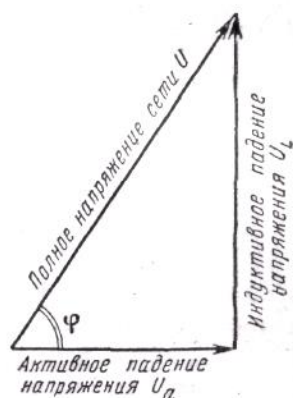


Рис. 114 Треугольник напряжения

Таким образом, средняя, или активная, мощность P переменного тока зависит не только от величин напряжения U и тока I но также и от сдвига фаз φ между ними.

Заштрихованный на рис. 113 треугольник напряжений начертим отдельно (рис. 114). Так как этот треугольник прямоугольный, то в случае, когда одна сторона неизвестна, ее можно определить с помощью теоремы Пифагора (квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов). Следовательно,

$$U^2 = U_a^2 + U_L^2$$

откуда

$$U^2 = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}$$

Пример 43. Определить напряжение сети, которое необходимо приложить к зажимам катушки, чтобы в ней протекал ток в 5 А, если активное сопротивление катушки R равно 6 Ом, а индуктивное сопротивление X_L равно 8 Ом.

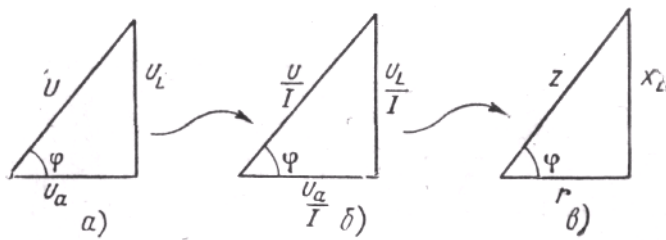


Рис. 115 Получение треугольника сопротивлений



Рис. 116 Треугольник сопротивлений

Активное падение напряжения $U_a = I \cdot R = 5 \cdot 6 = 30 \text{ В}$.

Индуктивное падение напряжения $U_L = I \cdot X_L = 5 \cdot 8 = 40 \text{ В}$.

Полное падение напряжения равно напряжению сети:

$$U^2 = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} =$$

$$\sqrt{900 + 1600} = 50 \text{ в.}$$

Необходимо отметить, что показание вольтметра сети не равно арифметической сумме значений U_a и U_L ($30 + 40 \neq 50$).

Если стороны треугольника напряжений (рис. 115, а) разделить на величину тока I (рис. 115, б), то углы треугольника от этого не изменятся, и мы получим новый треугольник, подобный первому, - треугольник сопротивлений (рис. 115, в).

В треугольнике сопротивления, показанном отдельно на рис. 116 все стороны обозначают сопротивления, причем гипотенуза его является полным сопротивлением цепи.

Из треугольника сопротивлений видно, что полное сопротивление z равно геометрической сумме активного r и индуктивного X_L сопротивлений.

Применяя теорему Пифагора к треугольнику сопротивлений, получаем

$$z^2 = r^2 + X_L^2,$$

откуда

$$z = \sqrt{r^2 + X_L^2}$$

Из треугольника сопротивлений также получаем:

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}; \quad \sin \varphi = \frac{X_L}{z};$$

$$r = z \cos \varphi; \quad X_L = z \sin \varphi. \text{ Если}$$

$$U_a = Ir \text{ и } U_L = IX_L,$$

$$\text{То } U = Iz$$

Из формулы $U = IZ$ видно, что

$$I = \frac{U}{Z} \text{ или } I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + X_L^2}}$$

Это и есть формула закона Ома для цепи с последовательным соединением r и L .

Пример 44. Определить ток, проходящий через катушку, индуктивное сопротивление которой равно 5 Ом, а активное сопротивление равно 1 Ом, если напряжение сети переменного тока равно 12 В. Определим полное сопротивление катушки:

$$z = \sqrt{r^2 + X_L^2} = \sqrt{1^2 + 5^2} = \sqrt{26} = 5,1 \text{ Ом.}$$

Применяя формулу закона Ома для цепи r, L , получим

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{12}{5,1} = 2,35 \text{ A.}$$

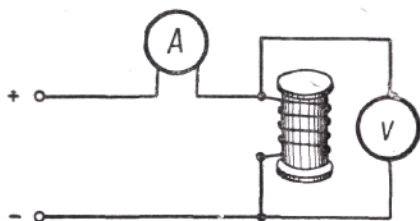


Рис.117 определение активного сопротивления потребителя переменного тока

В частных случаях, когда в цепи переменного тока имеется только активное сопротивление r , ток определяется по формуле

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

В случаях, если в цепи имеется индуктивное сопротивление, а активное сопротивление так мало, что им можно прене-

бречь, формула закона Ома приобретает вид

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

Если необходимо узнать активное сопротивление потребителя переменного тока (обмотка электродвигателя, индуктивной катушки или электромагнита), то нужно включить этот потребитель в цепь постоянного тока (рис. 117). Деля показание вольтметра, включенного к зажимам потребителя, на показание амперметра, включенного последовательно в цепь, получим величину активного сопротивления, так как $r = \frac{U}{I}$

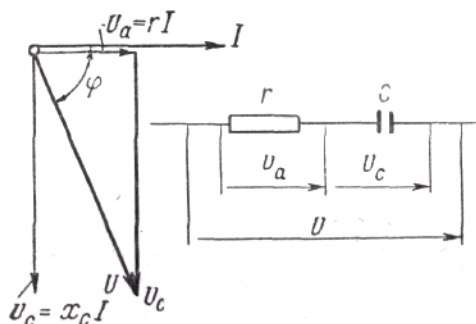
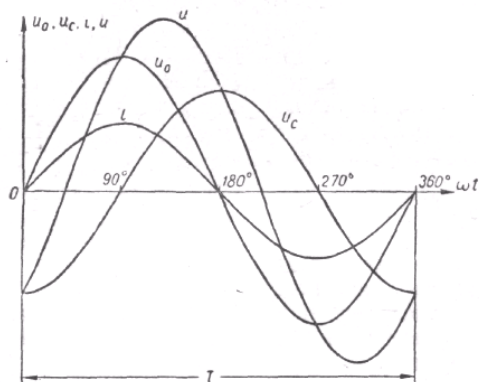


Рис.118 Последовательное r, C соединение

Сказанное справедливо только при низких частотах, когда явлением поверхностного эффекта можно пренебречь и считать активное сопротивление потребителя равным его сопротивлению при постоянном токе.

Последовательное соединение активного сопротивления и емкости (r, c)

На рис. 118 даны схема и векторная диаграмма для цепи с последовательным соединением активного сопротивления и емкости. Напряжение сети U



представляет собой геометрическую сумму падений напряжения на отдельных участках цепи, т. е. активного падения напряжения U_a , совпадающего по фазе с током, и падения напряжения на емкостном сопротивлении U_c , отстающего от тока по фазе на 90° . Ток опережает по фазе напряжение, приложенное к зажимам цепи, на угол ϕ , тангенс угла которого найдем из векторной диаграммы рис. 118:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{U_c}{U_a} = \frac{I x_c}{I r} = \frac{x_c}{r} = \frac{1}{r \omega C}$$

На рис. 119 даны кривые мгновенных значений напряжений и тока для последовательного соединения r и C . Кривая

мгновенной мощности для этого случая показана на рис. 120.

Из графика видно, что в течение некоторой части периода энергия затрачивается в цепи на нагрев сопротивления r и образование электрического поля (мощность положительная). В течение другой части периода энергия, накопленная в электрическом поле конденсатора, возвращается обратно в сеть. Из векторной диаграммы находим

$$U = \sqrt{I^2 r^2 + I^2 x_c^2} = I \sqrt{r^2 + x_c^2}$$

Обозначая

$$Z = \sqrt{r^2 + x_c^2}$$

получаем закон Ома для цепи с последовательным соединением активного сопротивления и емкости (цепи r и C):

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_c^2}}$$

где Z - полное сопротивление цепи.

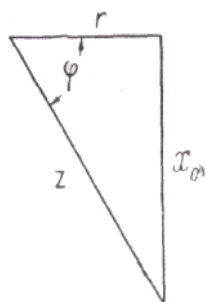


Рис. 121 Треугольник сопротивлений для последовательного r, C -соединения

Деля стороны треугольника напряжений (рис. 118) на величину тока I , получим треугольник сопротивлений для той же цепи (см. рис. 121).

Если Синусоидальное напряжение приложено к конденсатору с идеальным диэлектриком, то в цепи протекает емкостный ток, опережающий напряжение по фазе на 90° . Мощность P , потребляемая конденсатором, равна нулю. Когда синусоидальное напряжение приложено к конденсатору с реальным диэлектриком, то, как показывают измерения, ток в цепи опережает напряжение на угол φ , меньший 90° . Отсюда следует, что включение конденсатора с реальным диэлектриком в цепи переменного тока можно представить схематически как последовательное соединение r и C . Мощность P потребляемая конденсатором, в этом случае выделяется в диэлектрике в виде тепла. Эта мощность называется диэлектрическими потерями.

Последовательное соединение активного сопротивления, индуктивности и емкости (R, L, C).

На рис. 122 даны схема и векторная диаграмма для цепи с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости.

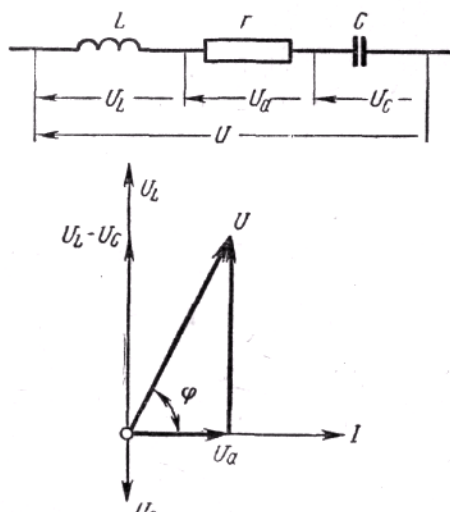


Рис.122 Последовательное r, L, C - соединение

Напряжение на зажимах цепи равно геометрической сумме падений напряжения на отдельных участках цепи: активного падения напряжения и падений напряжений на индуктивном и емкостном сопротивлениях.

Напряжения U_L и U_C сдвинуты между собой по фазе на полпериода (180°). Поэтому при геометрическом сложении векторов они взаимно вычитаются.

Из векторной диаграммы находим

$$U = \sqrt{I^2 r^2 + I^2 x^2} = I \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}$$

Закон Ома для данной цепи будет

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}}$$

где полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}$$

Расчетная величина $x = x_L - x_C$ называется реактивным сопротивлением цепи. Для рассматриваемой цепи

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}}$$

Если x_L больше x_C , то цепь в целом носит индуктивный характер, т. е. вектор тока I отстает по фазе от вектора напряжения цепи U .

Если же X_c больше X_L , то цепь в целом носит емкостный характер, т. е. вектор тока I опережает по фазе вектор общего напряжения U .

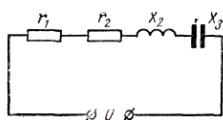
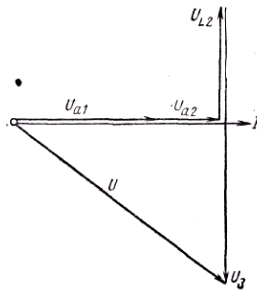


Рис. 123К примеру 45



Пример 45. В электрическую цепь напряжения $U = 220$ В последовательно включены: реостат сопротивлением $r_1 = 5$ Ом, катушка с активным сопротивлением $r_2 = 3$ Ом и индуктивным сопротивлением $x_L = 4$ Ом, конденсатор с емкостным сопротивлением $x_c = 10$

Ом.

Определить ток в цепи и напряжения на отдельных элементах цепи. Решить пример, дать схему и векторную диаграмму:

$$Z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_c)^2} = \sqrt{(5+3)^2 + (10-4)^2} = 10 \text{ Ом},$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А},$$

$$U_{a1} = I \cdot r_1 = 22 \cdot 5 = 110 \text{ В},$$

$$U_{a2} = I \cdot r_2 = 22 \cdot 3 = 66 \text{ В},$$

$$U_{L2} = I \cdot X_L = 22 \cdot 4 = 88 \text{ В},$$

$$U_{C2} = I \cdot X_C = 22 \cdot 10 = 220 \text{ В}.$$

Схема и векторная диаграмма даны на рис. 123.

Резонанс напряжений

Если в последовательной цепи, содержащей индуктивность и емкость, $X_L = X_c$, то

$$X = X_L - X_c = 0; \quad z = r, \quad I = \frac{U}{r}; \quad \cos \varphi = 1$$

т. е. цепь будет вести себя так, как будто она содержит только одно активное сопротивление. При этом ток и напряжение совпадают по фазе. Этот случай называется резонансом напряжений. График и векторная диаграмма для резонанса напряжений показаны на рис. 124.

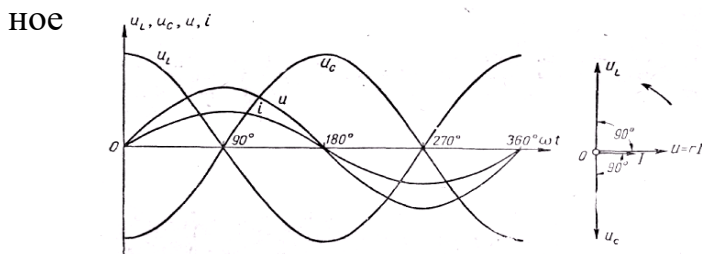


рис. Рис.124 График и векторная диаграмма для резонанса напряжений

Условием резонанса напряжений является равенство

$$X_L = X_c \text{ или } \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Поэтому резонанс напряжений в цепи с последовательным соединением r , L и C может наступить;

1)если при постоянной индуктивности емкость меняется и становится равной

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}.$$

2)если при постоянной емкости меняется индуктивность и становится равной

$$L = \frac{1}{\omega^2 C}$$

3) если изменение обеих величин L и C приводит к равенству

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

4) если, наконец, угловая частота сети, изменяясь, становится равной учитывая, что $\omega = 2\pi f$, получаем следующее выражение для частоты f_0

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Эту частоту принято называть резонансной.

Пример 46. Имеется цепь, состоящая из последовательно соединенных активного сопротивления, индуктивности и емкости, причем $r=6 \text{ Ом}$, $X_L=10 \text{ Ом}$, $X_C=2 \text{ Ом}$. Напряжение на зажимах цепи 120 В . Определить ток цепи при заданных сопротивлениях, а также ток при резонансе напряжений, если $X_L = X_C = 10 \text{ Ом}$.

Ток в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{120}{\sqrt{6^2 + (10 - 2)^2}} = \frac{120}{10} = 12 \text{ А}$$

Напряжения на отдельных участках цепи:

$$U_a = I \cdot r_1 = 12 \cdot 6 = 72 \text{ В};$$

$$U_L = I \cdot X_L = 12 \cdot 10 = 120 \text{ В};$$

$$U_C = I X_C = 12 \cdot 2 = 24 \text{ В}.$$

Ток при резонансе напряжений

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{6} = 20 \text{ А}.$$

Напряжения на отдельных участках цепи:

$$U_{a1} = I \cdot r_1 = 20 \cdot 6 = 120 \text{ В};$$

$$U_L = I \cdot X_L = 20 \cdot 10 = 200 \text{ В};$$

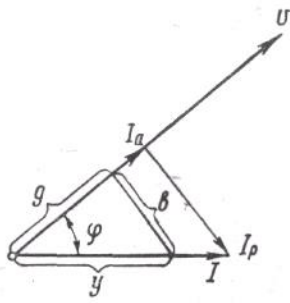


Рис.125 Разложение тока на активную и реактивную составляющие

$$U_c = IX_c = 20 \cdot 10 = 200 \text{ В.}$$

Как видно из примера, ток при резонансе напряжений увеличился, напряжения на отдельных участках цепи увеличились. При известных условиях это может представить опасность для некоторых установок переменного тока, так как чрезмерное увеличение напряжения на участках цепи может привести к пробое изоляции катушек, аппаратов, приборов, пробое диэлектрика конденсатора и т. д. Явление резонанса напряжений используется в радиотехнических схемах и

других устройствах.

Разветвленные цепи переменного тока

Пусть мы имеем векторную диаграмму, изображенную на рис. 125. Проектируя вектор тока I на направление вектора напряжения U , разложим вектор тока на две составляющие.

Одна из составляющих совпадает по направлению с вектором напряжений и называется активной составляющей тока. Она обозначается буквой I_a и равна

$$I_a = I \cos \varphi.$$

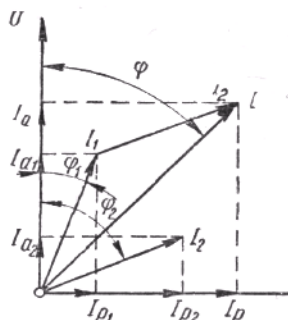
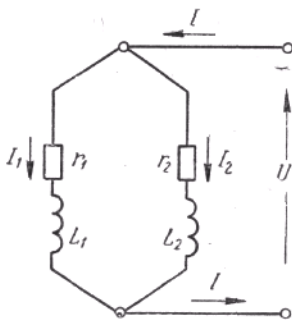
Другая составляющая, перпендикулярная вектору напряжения, называется реактивной составляющей тока. Она обозначается буквой I_p и равна

$$I_p = I \sin \varphi.$$

Таким образом, переменный ток I можно рассматривать как геометрическую сумму двух составляющих: активной I_a и реактивной I_p . Применение этого приема позволяет сравнительно просто производить расчеты разветвленных цепей переменного тока.

Рассмотрим разветвленную цепь, изображенную на рис. 160.

Токи в ветвях:



$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L_1)^2}}$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L_2)^2}}$$

Углы сдвига фаз между напряжением и токами в ветвях:

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{Z_1} \quad \text{и} \quad \cos \varphi_2 = \frac{r_2}{Z_2}.$$

Рис.126 Параллельное соединение ветви $r_1 L_1$ и $r_2 L_2$

На рис. 126 справа построена векторная диаграмма для параллельного соединения ветвей r_1, L_1 и r_2, L_2 . Построение диаграммы начинается с вектора напряжения, так как напряжение является общим для двух ветвей. Ввиду наличия r и L в каждой из ветвей токи I_1 и I_2 отстают по фазе от напряжения U на углы φ_1 и φ_2 .

Построив векторы токов I_1 и I_2 и сложив их по правилу параллелограмма, получим вектор тока I протекающего на общем участке цепи. Из построения диаграммы видно, что

$$I_a = I_{a1} + I_{a2}$$

$$I_p = I_{p1} + I_{p2}$$

Общий ток равен

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$$

Порядок расчета разветвленной цепи покажем на числовом примере.

Пример 47. Для цепи, показанной на рис. 160, дано:

$r_1 = 4 \text{ Ом}; L_1 = 0,01 \text{ Гн}; r_2 = 3 \text{ Ом}; L_2 = 0,02 \text{ Гн}.$

Напряжение сети 127 В , частота $50 \text{ Гц}.$

Определить токи в ветвях и на общем участке цепи.

Решение.

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2} = \sqrt{4^2 + (2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,01)^2} = 5,075 \text{ Ом}$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{4}{5,075} = 0,788 \quad \sin \varphi = \frac{x_1}{z_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,01}{5,075} = 0,62$$

$$Z_2 = \sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2} = \sqrt{4^2 + (2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,02)^2} = 6,95 \text{ Ом}$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{3}{6,95} = 0,788 \quad \sin \varphi = \frac{x_2}{z_2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,02}{6,95} = 0,9$$

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{127}{5,075} = 25 \text{ А} \quad I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{127}{6,95} = 18,3 \text{ А}$$

Для определения общего тока предварительно находим активные и реактивные составляющие токов:

$$I_{a1} = I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 25 \cdot 0,788 = 19,7 \text{ А};$$

$$I_{a2} = I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 18,3 \cdot 0,432 = 7,95 \text{ А};$$

$$I_{p1} = I_1 \cdot \sin \varphi_1 = 25 \cdot 0,62 = 15,5 \text{ А};$$

$$I_{p2} = I_2 \cdot \sin \varphi_2 = 18,3 \cdot 0,9 = 16,5 \text{ А};$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 19,7 + 7,95 = 27,65 \text{ А};$$

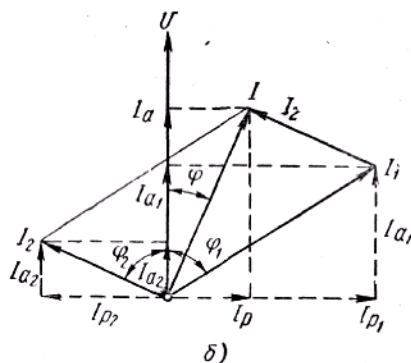
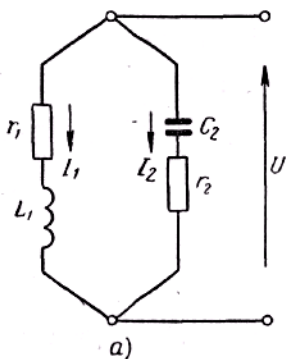


Рис.127 Параллельное соединение ветвей L и C

$$I_p = I_{p1} + I_{p2} = 15,5 + 16,5 = 32 \text{ А};$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{27,65^2 + 32^2} = 42,2 \text{ А}.$$

Рассмотрим параллельное соединение ветвей, содержащих L и C (рис. 127, а):

полные сопротивления ветвей будут:

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}$$

$$Z_2 = \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}$$

токи ветвей:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L_1)^2}}$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}}$$

углы сдвига фаз между напряжением и токами в ветвях:

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} \quad \sin \varphi = \frac{x_1}{z_1}$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} \quad \sin \varphi = \frac{x_2}{z_2}$$

Векторная диаграмма, показанная на том же чертеже *б*, начинается с построения вектора напряжения *U*. Затем под углами φ и φ_2 строятся векторы токов I_1 и I_2 . Следует заметить, что ток I_1 в ветви с индуктивностью отстает по фазе от напряжения на угол φ_1 а ток I_2 в цепи с емкостью опережает по фазе напряжение на угол φ_2 . Складывая векторы токов I_1 и I_2 по правилу параллелограмма, получаем вектор тока *I*.

Из построения векторной диаграммы видно, что активная составляющая общего тока равна сумме активных составляющих токов в обеих ветвях:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2}$$

Реактивная составляющая общего тока равна разности реактивных составляющих -индуктивной I_{p1} и емкостной I_{p2} :

$$I_p = I_{p1} - I_{p2}$$

Общий ток

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$$

Пример 48. Для цепи, представленной на рис. 127, дано: $r_1 = 5 \text{ Ом}$, $L_1 = 0,05 \text{ Гн}$, $r_2 = 5 \text{ Ом}$, $C_2 = 100 \text{ мкФ}$. Напряжение сети 220 В , частота 50 Гц . Найти токи в ветвях и на общем участке цепи.

Решение.

$$x_1 = 2\pi f L_1 = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,05 = 15,7 \text{ Ом};$$

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} = \sqrt{5^2 + 15,7^2} = 16,5 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{5}{16,5} = 0,303 \quad \sin \varphi = \frac{x_1}{z_1} = \frac{15,7}{16,5} = 0,95$$

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{220}{16,5} = 13,33 \text{ А}$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C_2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 100} = 31,8$$

$$Z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2} = \sqrt{5^2 + 31,8^2} = 32,2 \text{ ом}$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{5}{32,2} = 0,155 \quad \sin \varphi = \frac{x_2}{z_2} = \frac{31,8}{32,2} = 0,99$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{220}{32,2} = 6,84 \text{ A}$$

Для определения общего тока предварительно находим активные и реактивные составляющие токов:

$$I_{a1} = I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 13,33 \cdot 0,303 = 4,05 \text{ A};$$

$$I_{a2} = I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 6,84 \cdot 0,155 = 1,06 \text{ A};$$

$$I_{p1} = I_1 \cdot \sin \varphi_1 = 13,33 \cdot 0,303 = 12,6 \text{ A};$$

$$I_{p2} = I_2 \cdot \sin \varphi_2 = 6,84 \cdot 0,155 = 1,06 \text{ A};$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 4,05 + 1,06 = 5,11 \text{ A};$$

$$I_p = I_{p1} - I_{p2} = 12,6 - 1,06 = 11,54 \text{ A};$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{5,11^2 + 11,54^2} = 12,6 \text{ A}.$$

Резонанс токов

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из двух параллельных ветвей, одна из которых содержит активное сопротивление r_1 и индуктивное x_1 , а другая активное сопротивление r_2 и емкостное x_2 (рис. 127).

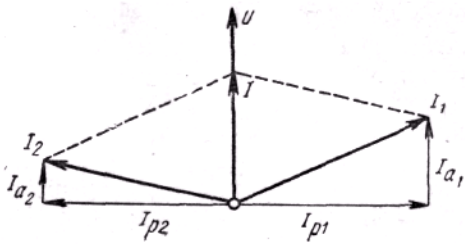


Рис.128 Векторная диаграмма резонанса токов

Если реактивные составляющие токов в ветвях с индуктивностью I_L и емкостью I_C равны между собой (рис. 128), т. е. $I_L = I_C$, то ток I на неразветвленном участке цепи совпадает по фазе с напряжением U , а угол $\varphi_{\text{общ}} = 0$, $\cos \varphi_{\text{общ}} = 1$. Этот случай называется резонансом токов. При резонансе токов реактивные токи - индуктивный и емкостный - взаимно компенсируются, так что из сети поступает в цепь только активный ток $I_a = I_{a1} + I_{a2}$.

При надлежащем выборе индуктивности L , емкости C или частоты f питающей сети можно получить явление резонанса токов в разветвленной цепи. Ток I в общей неразветвленной части цепи при резонансе токов может быть значительно меньше, чем токи в ветвях с индуктивностью и емкостью. Явление резонанса токов используется в схемах радиотехники и в электротехнических установках.

Пример 49. На рис. 129 представлена разветвленная цепь, состоящая из трех параллельных ветвей, причем одна ветвь содержит только индуктивность L_1 другая только емкость C_2 , а третья только активное сопротивление r_3 .

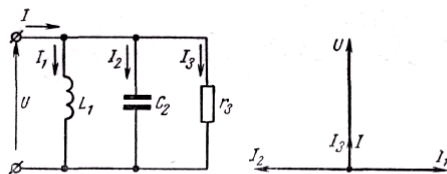


Рис.129 К примеру 49

Известно: $x_1 = x_2 = 10 \text{ Ом}$, $r_3 = 40 \text{ Ом}$, $U = 120 \text{ В}$.

Определить токи в ветвях и общий ток цепи. Решение.

$$I_1 = \frac{U}{X_1} = \frac{120}{10} = 12 \text{ А}$$

$$I_2 = \frac{U}{X_2} = \frac{120}{10} = 12 \text{ А},$$

$$I_3 = \frac{U}{X_3} = \frac{120}{40} = 3 \text{ А},$$

Из векторной диаграммы (рис. 163) видно:

$$I = I_3 = 3 \text{ А}.$$

Мощности в цепях переменного тока

В большинстве случаев электрические цепи содержат как активное, так и реактивное сопротивления. К такого рода цепям относятся, в частности, двигатели переменного тока, трансформаторы и другие устройства. В этих цепях между напряжением U и током I существует сдвиг фаз φ . Если к цепи приложено синусоидальное напряжение

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

ТО ТОК В ЦЕПИ

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Мгновенная мощность цепи

$$p = u i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = U_m \cdot I_m [\sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi)] = -UI [2 \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi)].$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках, можно на основании тригонометрической формулы представить как разность косинусов
 $[\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]$.

Таким образом,

$$p = UI [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] = UI \cdot \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi).$$

Среднее значение мгновенной мощности за период равно $UI \cos \varphi$, так как среднее значение $\cos(2\omega t - \varphi)$ за период равно нулю. Следовательно, активная мощность цепей переменного тока определяется в общем случае формулой

$$P = UI \cdot \cos \varphi.$$

Множитель $\cos \varphi$ называют коэффициентом мощности.

Учитывая, что $U = IZ$, а $\cos \varphi = \frac{r}{Z}$ получаем

$$P = IZ \frac{r}{Z} I = Ir.$$

Активная мощность измеряется в ваттах (*вт*) или в киловаттах (*кВт*).

Произведение $P t$ называется **активной энергией** и измеряется в *вт • сек* или в *кВт • ч*:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ 000 Вт} \cdot \text{сек} (\text{дж}).$$

Активная энергия, потребляемая электрической цепью, полностью преобразуется в тепло в активном сопротивлении этой цепи и обратно к источнику не возвращается.

Если величины сторон треугольника сопротивлений (рис. 130, а) умножить на величину P (рис. 130, б), то получим треугольник мощностей (рис. 130, в). Все стороны этого треугольника, показанного отдельно на рис. 131, представляют собой мощности.

Катет, прилегающий к углу φ , представляет собой известную нам активную мощность P :

$$P = I^2 r = UI \cos \varphi.$$

Активная мощность в цепях переменного тока преобразуется в тепло. В двигателях переменного тока большая часть активной мощности превращается в механическую мощность, остальная часть также преобразуется в тепло.

Катет, лежащий против угла φ , есть реактивная мощность Q :

$$Q = I^2 x = UI \sin \varphi.$$

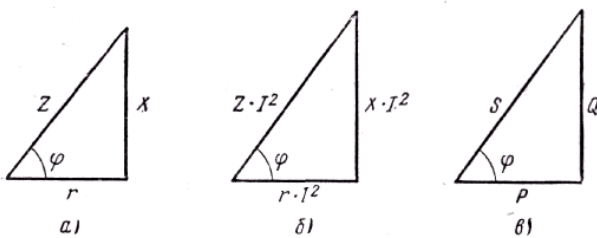


Рис.130 Получение треугольника мощностей

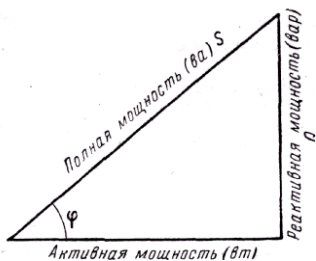


Рис.131 треугольник мощностей

Реактивная мощность обусловлена наличием магнитных и электрических полей в электрических цепях.

Как уже указывалось, реактивная мощность характеризует интенсивность обмена энергией между источником, с одной стороны, и магнитными и электрическими полями - с другой.

Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных ($ВАр$) или киловольт-амперах реактивных ($кВАр$). Гипотенуза треугольника мощностей представляет собой полную мощность:

$$S = P_z = UI,$$

или

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

Она измеряется в вольт-амперах ($ВА$) или киловольт-амперах ($кВА$). Величина полной мощности, равная произведению $U \cdot I$, определяет основные габариты (наибольшие размеры) генераторов и трансформаторов. В самом деле, величина тока I определяет необходимое по условиям нагрева сечение проводов генераторов и трансформаторов, а число витков обмоток, их изоляция, а

также размеры магнитопроводов пропорциональны величине напряжения U .

Таким образом, чем больше значения U и I , на которые рассчитываются генераторы и трансформаторы, тем больше должны быть их размеры.

Пример 50 Рассмотрим электрическую цепь, показанную на рис. 131, в которую входят индуктивное и активное сопротивления и измерительные приборы - амперметр,

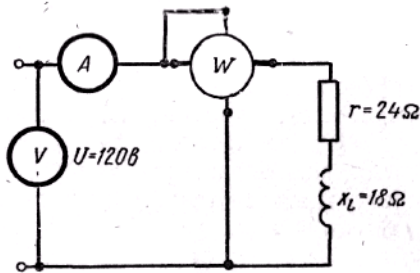


Рис.131 Электрическая цепь с активным и индуктивным сопротивлениями и измерительными приборами

вольтметр и ватт метр.

1. Если подключить эту цепь к постоянному напряжению $U = 120$ В, то, поскольку индуктивное сопротивление X_L при постоянном токе будет равно нулю, в цепи остается одно активное сопротивление r и тогда

$$I_1 = \frac{U}{r} = \frac{120}{24} = 5A$$

Амперметр покажет ток 5 А.

Мощность

$$P = IU = 5 \cdot 120 = 600 \text{ Вт},$$

или

$$P = IU = 25 \cdot 24 = 600 \text{ Вт}.$$

Ваттметр покажет 600 Вт. Показание ваттметра, включенного в цепь постоянного тока, равно произведению показаний вольтметра и амперметра.

2. Подключим ту же цепь к переменному напряжению $U = 120$ В.

В этом случае

$$Z = \sqrt{r^2 + x_C^2} = \sqrt{24^2 + 18^2} = \sqrt{900} = 30 \text{ Ом}.$$

Ток в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{120}{30} = 4A$$

Амперметр покажет ток 4 а.

Подсчитаем мощность, идущую на нагрев:

$$P = I^2 r = 4^2 \cdot 24 = 384 \text{ Вт.}$$

Действительно, активная мощность потребляемая цепью, равна

$$P = UI \cdot \cos \varphi = 120 \cdot 4 \cdot \frac{24}{30} = 384 \text{ Вт.}$$

Показание ваттметра в этом случае будет 384 Вт. Полная мощность

$$S = UI = 120 \cdot 4 = 480 \text{ ВА.}$$

Следовательно, генератор, питающий эту цепь, отдает полную мощность $S = 480 \text{ ВА}$. Но в самой цепи только активная мощность $P = 384 \text{ Вт}$ безвозвратно преобразуется в тепло.

Отсюда видно, что цепь переменного тока, содержащая наряду с активным сопротивлением индуктивное, из всей получаемой ею энергии только часть расходует на тепло. А остальная часть - реактивная энергия - то поступает в цепь от генератора и запасается в магнитном поле катушки, то возвращается обратно генератору.

Коэффициент мощности («косинус фи»)

Коэффициентом мощности, или «косинусом фи» ($\cos \varphi$), цепи называется отношение активной мощности к полной мощности.

Коэффициент мощности = активная мощность/полная мощность
или

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

В общем случае активная мощность меньше полной мощности, т. е. у этой дроби числитель меньше знаменателя, и поэтому коэффициент мощности меньше единицы.

Только в случае чисто активной нагрузки, когда вся мощность является активной, числитель и знаменатель этой дроби равны между собой, и поэтому коэффициент мощности равен единице.

Чем большую часть полной мощности составляет активная мощность, тем меньше числитель отличается от знаменателя дроби и тем ближе коэффициент мощности к единице.

Величину $\cos \varphi$ можно косвенно определить по показаниям ваттметра, вольтметра и амперметра:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}.$$

Коэффициент мощности можно также измерить особым прибором - фазометром.

Пример 50. Амперметр показывает ток 10 A , вольтметр - 120 B , ваттметр - 1 кВт . Определить $\cos \varphi$ потребителя:

$$S = IU = 10 \cdot 120 = 1200\text{ ВА},$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1000}{1200} = 0,83$$

Пример 51. Определить активную мощность, отдаваемую генератором однофазного переменного тока в сеть, если

вольтметр на щите генератора показывает 220 B , амперметр - 20 A и фазометр - $0,8$:

$$P = UI \cos \varphi = 20 \cdot 220 \cdot 0,8 = 3520\text{ Вт} = 3,52\text{ кВт}.$$

Полная мощность

$$S = UI = 20 \cdot 220 = 4400\text{ ВА} = 4,4\text{ кВА}.$$

Пример 52. Вольтметр, установленный на щитке электродвигателя, показывает 120 B , амперметр - 450 A , ваттметр - 50 кВт . Определить z , r , X , S , $\cos \varphi$, Q :

Так как $P = I^2 r$, то

$$r = \frac{P}{I^2} = \frac{50000}{450^2} = 0,247$$

$$X_L = \sqrt{z^2 - r^2} = \sqrt{0,267^2 - 0,247^2} = \sqrt{0,01} = 0,1\text{ Ом};$$

$$S = IU = 450 \cdot 120 = 54000\text{ ВА} = 54\text{ кВА};$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{50000}{54000} = 0,927$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{54000^2 - 50000^2} = 20396\text{ ВАр} = 20,396\text{ кВАр}.$$

Из построения треугольников сопротивлений, напряжений и мощностей для определенной цепи видно, что эти треугольники подобны один другому, так как их стороны пропорциональны. Из каждого треугольника можно найти «косинус фи» цепи, как показано на рис. 132. Этим можно воспользоваться для решения самых разнообразных задач.

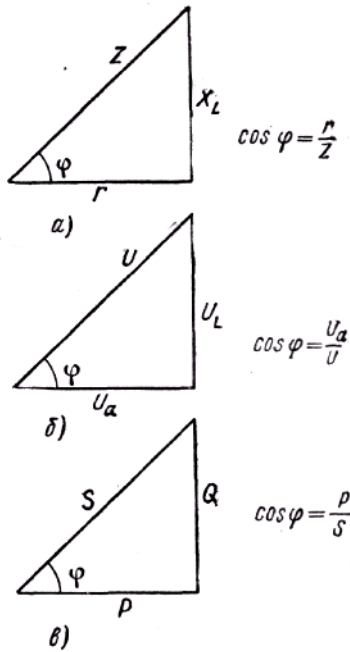


Рис.132 Определение коэффициента мощности из треугольников сопротивлений (а), напряжений (б), мощностей (в)

Пример 53. Определить z , x_L , U , U_a , U_L , S , P , Q , если $I = 6\text{ А}$, $r = 3\text{ Ом}$, $\cos \varphi = 0,8$ и ток отстает по фазе от напряжения.

Из треугольника сопротивлений известно, что

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}.$$

отсюда

$$z = \frac{r}{\cos \varphi} = \frac{3}{0,8} = 3,75\text{ Ом};$$

$$U = I z = 6 \cdot 3,75 = 22,5\text{ В};$$

$$X_L = \sqrt{z^2 - r^2} = \sqrt{3,75^2 - 3^2} = \sqrt{5,06} = 2,24\text{ Ом};$$

$$U_a = I r = 6 \cdot 3 = 18\text{ В}; U_L = I X_L = 6 \cdot 2,24 = 13,45\text{ В};$$

$$S = I U = 6 \cdot 22,5 = 135\text{ ВА},$$

или

$$P = I^2 r = 36 \cdot 3 = 108\text{ Вт};$$

$$P = I U \cos \varphi = 6 \cdot 22,5 \cdot 0,8 = 108\text{ Вт};$$

$$Q = I U_L = 6 \cdot 13,45 = 81\text{ ВАр},$$

или

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{135^2 - 108^2} = \sqrt{6561} = 81\text{ ВАр},$$

или

$$Q = I X_L = 6^2 \cdot 2,24 = 81\text{ ВАр}.$$

Основными потребителями электрической энергии являются электрические двигатели, машины и электронагревательные устройства. Все они потребляют активную мощность, которую преобразуют в механическую работу и тепло. Электрические двигатели потребляют также реактивную мощность. Последняя, как известно, совершает колебательное движение от источника к двигателю и обратно.

У ламп и электрических печей сопротивления $S = P$ и $\cos \varphi = 1$. У электрических двигателей $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ и $\cos \varphi$ меньше 1.

При неизменной передаваемой активной мощности P величина нагрузочного тока обратно пропорциональна значению $\cos \varphi$:

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}$$

Это означает, что при тех же значениях активной мощности P и напряжения U нагрузочный ток электрических двигателей больше, чем у электрических ламп. Если, например, коэффициент мощности электрического двигателя равен 0,5, то он потребляет в 2 раза больший ток, чем электрическая печь сопротивления той же мощности P .

Потери мощности на нагрев проводов линии пропорциональны квадрату тока $\Delta P = I^2 r$.

Таким образом, при $\cos \varphi = 0,5$ потери мощности в линии, по которой энергия передается потребителям, больше в 4 раза, чем при $\cos \varphi = 1$. Кроме того, генераторы и трансформаторы будут загружены током в 2 раза больше и

в этом случае требуется примерно в 2 раза большее сечение проводов для обмоток.

Отсюда видно, какое важное значение имеет величина $\cos \varphi$ в электро-энергетических установках. Для повышения коэффициента мощности промышленных установок, на которых преобладающая часть потребителей - электрические двигатели, параллельно им включают конденсаторы, т. е. добиваются резонанса токов, при котором $\cos \varphi$ близок 1.

ЗАДАЧИ

1. Определить частоту переменного тока, получаемого от генератора с 24 полюсами, при 250 оборотах ротора в минуту.

2. Двадцати полюсный генератор переменного тока дает ток частоты 50 Гц.

Определить число оборотов ротора генератора в минуту.

3. Определить- число полюсов генератора переменного тока, если скорость вращения ротора генератора равна 300 об/мин, а частота 50 Гц.

4. Катушка включена в сеть однофазного переменного тока напряжением 120 В; э. д. с. самоиндукции равна 100 В. Чему равно активное падение напряжения?

5. Что покажет вольтметр, включенный на зажимы обмотки электромагнита, если индуктивное сопротивление обмотки равно 6 Ом, активное сопротивление 8 Ом, а ток, протекающий по виткам обмотки, равен 5 А?

6. Когда катушку включили в сеть постоянного тока напряжением 120 В, амперметр показал ток 4 А; когда ту же катушку включили в сеть переменного тока напряжением 380 В, амперметр показал 5 А. Определить полное, активное и индуктивное сопротивления катушки.

7. Два проводника с активным сопротивлением 6 и 5 Ом и индуктивным сопротивлением 3 и 8 Ом включены последовательно. Какое напряжение нужно приложить, чтобы в цепи проходил ток 4 А?

8. По проводнику с активным сопротивлением 7 Ом и индуктивным сопротивлением 5 Ом проходит ток 6 А. Параллельно первому проводнику включен второй проводник с сопротивлением $r = 2$ Ом и $X_L = 4$ Ом. Определить ток во втором проводнике.

9. Однофазный электродвигатель, включенный в сеть 120 В, потребляет ток 2 А. Коэффициент мощности двигателя 0,85. Определить активную и полную мощности, забираемые двигателем из сети.

10. На распределительном щите установлены три прибора: амперметр, вольтметр и ваттметр. Показание амперметра 40 А, вольтметра 110 В, ваттметра 4 кВт. Определить Z , $r \cos \varphi$, Q , U_L , U_a , если известно, что нагрузка имеет индуктивный характер.

11. Определить ток, потребляемый однофазным двигателем мощностью 5 кВт, если он включен в сеть 120 В, а его коэффициент мощности равен 0,8.

12. На электростанции установлен генератор однофазного переменного тока мощностью 200 кВА, напряжением 100 В. Определить активную мощность, отдаваемую генератором в сеть, при коэффициентах мощности 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2. Найти также величину нагрузочного тока при этих значениях $\cos\varphi$.

13. Через индукционную катушку с $\cos\varphi=0,3$ проходит переменный ток в 10 А. Ваттметр, измеряющий мощность катушки, показал 250 Вт. Определить напряжение на зажимах катушки, ее полное, активное и индуктивное сопротивления.

14. Индуктивная катушка включена в сеть постоянного тока напряжением 12В и потребляет ток 8А. Тот же ток катушка потребляет при включении в сеть переменного тока напряжением 20В. Определить активное, индуктивное и полное сопротивления катушки; полную, активную и реактивную мощности.

15. Показания приборов: амперметра - 20 А, вольтметра - 120 В, фазометра - 0,8. Определить Z , r , S , p , Q , U_L , U_a , X_L .

16. Полезная мощность на валу однофазного двигателя 10 л. с., к.п.д. двигателя 85%, $\cos\varphi=0,8$, напряжение 220 В. Определить мощность генератора, питающего этот двигатель, если энергия передается по линии длиной 50 м, выполненной медным проводом сечением 16 мм². Индуктивным сопротивлением проводов линии можно пренебречь.

17. Показания приборов: амперметра-8 а, вольтметра-220 в, активное сопротивление катушки равно 15 Ом. Определить Z , r , S , P , Q , U_L , U_a , X_L , $\cos\varphi$ потребителя.

18. На паспорте однофазного двигателя написано: $U=120$ В, $I=5$ А, $\cos\varphi=0,8$. Определить активное, индуктивное и полное сопротивления обмотки двигателя.

19. В сеть однофазного тока включена катушка с сердечником из мягкой стали. В цепь катушки включены приборы: вольтметр, амперметр и ваттметр. Показание амперметра 5 А, вольтметра 120 В и ваттметра 200 Вт. Активное сопротивление катушки 2 Ом. Определить коэффициент мощности катушки, величину э. д. с. самоиндукции, потерю мощности в обмотке катушки, а также в сердечнике.

20. Дроссельная катушка (т. е. катушка со стальным сердечником) с коэффициентом мощности 0,2, включенная в сеть 60 В, потребляет ток 3 А. Активное сопротивление катушки 2 Ом. Определить величину э. д. с., индуктируемой в катушке, потерю мощности в обмотке и в сердечнике.

Вопросы для повторения

1. Как получается переменный ток?
2. Что называется периодом и частотой переменного тока?
3. Как определить частоту, если известно число полюсов и скорость вращения ротора генератора переменного тока?
4. Какие действия производит переменный ток?

5. Что называется действующим значением переменного тока?
6. В чем выражается действие индуктивности, включенной в цепь переменного тока?
7. Что называется активным и индуктивным сопротивлениями?
8. Что называется коэффициентом мощности?
9. Как измерить активную и полную мощности переменного тока?
10. Как проявляет себя емкость, включенная в цепь переменного тока?
11. Каким путем можно повысить «косинус фи» до 1?
12. Что называется резонансом напряжений?
13. Что называется резонансом токов?

Практическое занятие №5

Тема: «Электрические измерения и приборы. Расчёт погрешностей измерений.».

Электрические измерительные приборы - необходимые элементы электрических цепей при контроле режимов работы электрооборудования, учете электроэнергии, при экспериментальном исследовании электрических цепей, при получении достоверной информации для систем автоматического управления.

Электрические измерительные приборы измеряют как электрические величины (ток, напряжение, мощность, $\cos\varphi$, частоту, электрическую энергию и т.д.), так и неэлектрические величины (температуру, давление и др).

Электрические измерительные приборы отличаются высокой чувствительностью, простотой конструкций и надежностью. Показания электрических измерительных приборов относительно просто передавать на дальние расстояния (телеизмерения) при автоматизации и управлении технологическими процессами.

Недостатком электрических измерительных приборов является невозможность их применения во взрывоопасных и пожароопасных помещениях.

Системы электрических измерительных приборов

Электрический измерительный прибор состоит из подвижной и неподвижной частей. По перемещению подвижной части измеряют значения измеряемых величин.

В зависимости от принципа действия различают системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, тепловую, индукционную и др.

Таблица 5 Системы электрических измерительных приборов и их условные обозначения

N п/п	Система прибора	Обозначение
1	Магнитоэлектрическая	
2	Электромагнитная	
3	Электродинамическая	
4	Тепловая	
5	Индукционная	

В таблице 5 приведены условные обозначения наиболее широко применяемых систем приборов. Эти обозначения и другие важнейшие характеристики приборов указываются на лицевой панели электрических измерительных приборов (рис. 133).

Работа приборов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии поля постоянного магнита и подвижной катушки.

На рисунке 134 схематически показана основная часть магнитоэлектрического измерительного механизма: подвижная катушка, расположенная в сильном равномерном радиальном магнитном поле.



Рис.133. Шкала измерительного прибора

Подвижная катушка из тонкого медного или алюминиевого провода намотана на каркас (или без него). На оси подвижной части прибора укреплена стрелка, конец которой перемещается по шкале электрического измерительного прибора.

При протекании по катушке электрического тока, согласно закону Ампера, возникают силы F , стремящиеся повернуть катушку. При равенстве вращающего $M_{вр}$ и противодействующего моментов $M_{пр}$ катушка останавливается.

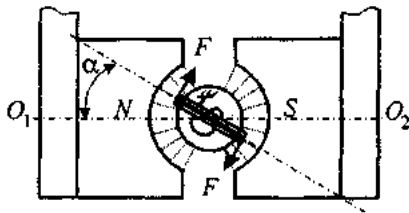


Рис. 134. Подвижная катушка в радиальном магнитном поле

Для создания противодействующего момента $M_{пр}$ и одновременно для подвода тока в катушку служат две спирали.

Общее выражение для вращающего момента имеет вид:

$$M_{вр} = dW / d\alpha, \quad (1)$$

где W - энергия электромагнитного поля, сосредоточенная в измерительном механизме;

α - угол поворота подвижной части.

Энергия электромагнитного поля W равна работе A по перемещению активной части провода катушки в постоянном магнитном поле с индукцией B .

Согласно закону Ампера, сила F , действующая на активную часть провода катушки при протекании по ней тока I , равна

$$F = I \cdot B \cdot l \sin \varphi, \quad (2)$$

где φ - угол между направлением тока в активной части провода и индукцией магнитного поля;

l - длина активной части катушки.

В нашем случае $\varphi = \pi/2, \sin \varphi = 1$. Следовательно, работа по перемещению двух активных частей провода катушки, перпендикулярных плоскости чертежа (рис. 134), равна

$$A = W = 2 \cdot F \cdot x = 2I \cdot B \cdot l \cdot r \cdot \alpha, \quad (3)$$

где $x = r \cdot \alpha$ - длина траектории активной части провода;

r - радиус траектории;

α - угол поворота катушки.

Подставляя (3) в (1) получаем

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW}{d\alpha} = 2I \cdot B \cdot l \cdot r.$$

Так как противодействующий момент $M_{\text{пр}}$ создается упругими элементами, то для установившегося режима

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{вр}} \text{ или } W\alpha = 2I \cdot B \cdot l \cdot r,$$

где W - удельный противодействующий момент, зависящий от свойств упругого элемента.

Следовательно, угол поворота катушки α пропорционален току I

$$\alpha = \frac{2B \cdot l \cdot r}{W} \cdot I = S \cdot I, \quad (4)$$

где S - чувствительность измерительного механизма.

Как видно из (134), при перемене направления тока в катушке меняется на обратное и направление отклонения подвижной части и указателя (стрелки).

Для получения отклонения указателя в нужную сторону необходимо при включении прибора соблюдать указанную на приборе полярность.

Достоинства приборов магнитоэлектрической системы: высокая чувствительность к измеряемой величине, высокая точность (класс точности до 0,05, малое потребление мощности, малая чувствительность к внешним магнитным полям). Недостаток - возможность применения только в цепях постоянного тока.

В приборах электромагнитной системы в неподвижной катушке, по которой протекает измеряемый ток, создается магнитное поле, в которое втягивается, поворачиваясь на оси, ферромагнитный сердечник, намагничиваемый этим же полем. Причем втягивание происходит как при постоянном, так и при переменном магнитном поле, а угол поворота α пропорционален квадрату силы измеряемого тока. Поэтому:

а) приборы электромагнитной системы могут применяться в цепях постоянного и переменного тока;

б) шкала прибора неравномерна, сильно сжата в начальной части.

Достоинства электрических измерительных приборов электромагнитной системы: простота и надежность конструкции, небольшое потребление мощности.

Недостатки: невысокая чувствительность к измеряемой величине, относительно низкая точность (класс точности до 1,0), большая чувствительность к внешним магнитным полям.

Вращающий момент электромагнитного измерительного механизма:

$$M_{\text{пр}} = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{d\left(\frac{L \cdot I^2}{2}\right)}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha}.$$

Если противодействующий момент создается с помощью упругих элементов, то для режима установившегося отклонения:

$$M = W\alpha \text{ и } \alpha = \frac{1}{2W} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha}. \quad (5)$$

Основные характеристики электрических измерительных приборов

Статическая характеристика. Статическая характеристика измерительного прибора - зависимость выходного сигнала y от входного сигнала x в статическом режиме работы указанного прибора.

Статическая характеристика в общем случае описывается нелинейным уравнением

$$y = f(x).$$

Так, например, для электронных измерительных приборов магнитоэлектрической системы статической характеристикой будет являться уравнение (3), в котором входным сигналом будет являться электрический ток I , а выходным - угол поворота катушки α :

$$\alpha = S \cdot I.$$

Поскольку $S = \frac{2 \cdot B \cdot L \cdot r}{W} = \text{const}$, то статическая характеристика электроизмерительного прибора магнитоэлектрической системы линейная.

Погрешность. Абсолютная погрешность прибора в данной точке диапазона измерения равна

$$\Delta = x - x_{\text{и}} \quad (6)$$

где x - показание прибора;

$x_{\text{и}}$ - истинное значение измеряемой величины.

Однако в связи с тем, что истинное значение чаще всего неизвестно, на практике вместо него используется действительное значение $x_{\text{д}}$, в качестве которого применяют либо среднее арифметическое значение ряда измерений, либо показания образцового прибора.

Очевидно, что абсолютная погрешность прибора выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина.

Абсолютная погрешность прибора не характеризует в полной мере точность измерения, поэтому при измерениях определяется также *относительная погрешность* - отношение абсолютной погрешности к истинному (действительному) значению измеряемой величины

$$\delta = \frac{\Delta}{x_u} = \frac{\Delta}{x_0}, \quad (7)$$

или в процентах

$$\delta(\%) = \frac{\Delta}{x_0} 100\%. \quad (8)$$

Приведенная погрешность γ электрического измерительного прибора равна отношению абсолютной погрешности к нормирующему значению x_N , которое принимается равным верхнему пределу измерений (если нулевая отметка находится на краю или вне шкалы) или диапазону измерения (если нулевая отметка находится внутри диапазона измерений):

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N},$$

или в процентах

$$\gamma(\%) = \frac{\Delta}{x_N} 100\%. \quad (9)$$

Погрешность электроизмерительного прибора зависит от условий проведения измерений. Различают основную и дополнительную погрешности.

Основная погрешность - это погрешность, существующая при нормальных условиях, которые указаны в нормативных документах, регламентирующих правила испытания и эксплуатации электроизмерительных приборов.

Под нормальными условиями, например, могут пониматься:

- температура окружающей среды $(+20 \pm 2)^\circ\text{C}$;
- положение прибора горизонтальное, с отклонением от горизонтального не превышающим $\pm 2^\circ\text{C}$;
- относительная влажность $(65 \pm 15)\%$;
- практическое отсутствие внешних магнитных и электрических полей;
- частота питающей сети (50 ± 1) Гц и так далее.

Дополнительная погрешность возникает при отклонении условий испытания и эксплуатации прибора от нормальных.

Например, приведенная погрешность электронно-измерительных приборов при нормальных условиях не превышает 1%. Если же температура окружающей среды лежит вне указанного в нормальных условиях диапазона, то приведенная погрешность может превышать 1%.

Класс точности. *Класс точности* электронных измерительных приборов - обобщенная метрологическая характеристика, определяемая пределами допустимых основной и дополнительной погрешностей.

Класс точности K стрелочных и самопишущих приборов, как правило, обозначается одним числом, равным максимально допустимому значению основной приведенной погрешности, выраженной в процентах:

$$K = \frac{\Delta}{x_N} 100 = \gamma 100. \quad (10)$$

Электронные измерительные приборы делятся на 8 классов точности: 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 4.0.

Пример 54: Милливольтметр со шкалой до 50 мВ имеет класс точности $K = 0,5$. Определить максимальную абсолютную погрешность электронного измерительного прибора.

Решение:

Из (10) следует, что максимальная абсолютная погрешность при измерениях во всем диапазоне равна

$$\Delta = \frac{K \cdot x_N}{100} = \frac{0,5 \cdot 50}{100} = \pm 0,25 \text{ мВ}.$$

Вариация. *Вариация* показаний электроизмерительного прибора - это наибольшая разность его показаний при одном и том же значении измеряемой величины.

Основной причиной вариации является трение в опорах подвижной части прибора.

Вариацию определяют, сравнивая показания электроизмерительного прибора, считанные один раз после установки требуемого значения измеряемой величины подходом снизу (со стороны меньших значений), а другой раз - подходом сверху (со стороны больших значений).

Цена деления. *Цена деления* электроизмерительных приборов численно равна изменению измеряемой величины, вызывающему перемещение указателя (стрелки) на одно деление.

При равномерной шкале цена деления равна отношению предела измерения электроизмерительного прибора x_m к числу делений шкалы n :

$$c = \frac{x_m}{n}. \quad (11)$$

Предел измерения. *Предел измерения* электроизмерительного прибора - значение измеряемой величины, при котором стрелка прибора отклоняется до конца шкалы. Электроизмерительные приборы могут иметь несколько пределов измерения (многопредельные приборы). При измерениях такими приборами на различных пределах цена деления будет различна.

Чувствительность. Чувствительность S электроизмерительного прибора - это отношение изменения сигнала на выходе электроизмерительного прибора Δy к вызвавшему его изменению измеряемой величины Δx :

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (12)$$

В общем случае чувствительность

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}. \quad (13)$$

Следовательно, при нелинейной статической характеристике чувствительность зависит от x , а при линейной статической характеристике -она постоянна.

У электроизмерительных приборов при постоянной чувствительности шкала равномерная, то есть длина всех делений одинакова.

ЗАДАЧИ

1. Прибор показывает 9,9 А. Действительная величина тока 10 А. Определить погрешности и поправку. Шкала прибора на 20 А.

2. Определить сопротивление шунта к амперметру с внутренним сопротивлением 0,016 Ом, если показания прибора нужно увеличить в пять раз.

3. К амперметру включен шунт, сопротивление которого в 25 раз меньше сопротивления прибора. Какой ток протекает в цепи, если амперметр показал 3 А?

4. Вольтметром на 15 В нужно измерить напряжение 120 В. Определить величину добавочного сопротивления, если внутреннее сопротивление вольтметра 2000 Ом.

5. Обмотка напряжения вольтметра на 127 В обладает сопротивлением 8000 Ом. Каково должно быть добавочное сопротивление, чтобы этот вольтметр можно было включить в сеть 220 В?

6. Каковы погрешности однофазного ваттметра, показывающего 60 Вт при напряжении 120В токе 0,6 А и $\cos\varphi=0,83$?

7. Вольтметр включен через измерительный трансформатор 3000/100 В. Определить напряжение на стороне высоковольтных шин, если вольтметр показал 95 В.

8. Амперметр, включенный через трансформатор тока 150/5 А, показал 4 А.

9. Определить ток в первичной цепи.

10. Амперметр на 10 А, шкала которого имеет 100 делений, включен через трансформатор тока 500/5 А. Показания амперметра - 42 деления. Определить ток в первичной цепи трансформатора.

11. Трехфазный ваттметр включен через измерительные трансформаторы напряжения 3000/100 В и тока 50/5 А. Определить мощность первичной цепи, если ваттметр показал 150 Вт.

12. Ваттметр на 150 В, 5 А, 150 делений включен через измерительные трансформаторы 3300/100 В и 600/5 А. Вычислить мощность первичной цепи, если показание ваттметра 72 деления.

13. Однофазный ваттметр на 150 В, 5 А, 250 делений включен в трехфазную систему с равномерной нагрузкой через измерительные трансформаторы 500/100 В и 40/5 А. Определить мощность трехфазной сети, если ваттметр показал 50 делений.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте условия равновесия подвижной части электроизмерительного прибора.

2. Как можно разделить электроизмерительные приборы по роду измеряемой величины, по роду тока, по физическому принципу, по классу точности?

3. Каковы требования к электроизмерительным приборам?

4. Как устроены магнитоэлектрические измерительные приборы, их достоинства, недостатки и область применения?

5. То же для приборов электромагнитной системы.

6. То же, для приборов электродинамической системы.

7. То же, для приборов тепловой системы.

8. То же, для приборов индукционной системы.

9. То же, для приборов термоэлектрической системы.

10. То же, для приборов выпрямительной системы.

11. Какие условные обозначения помещаются на шкалах электроизмерительных приборов?

12. Какими приборами можно измерить мощность постоянного тока?

13. Как измерить мощность переменного тока?

14. Вычертить схему включения счетчика однофазного переменного тока;

15. Вычертить схему включения трехэлементного ваттметра в сеть трехфазного тока.

16. Вычертить схему включения двухэлементного трехфазного ваттметра в сеть высокого напряжения.

17. Как можно измерить реактивную энергию?

18. Как можно определить коэффициент мощности?

19. Как можно измерить сопротивление в сетях постоянного и переменного тока?

20. Как измеряют сопротивление изоляции проводов?

3.3 Лабораторные работы

Лабораторная работа №1

Тема: «Реверсивный пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором»

Цель работы: Экспериментальным путём изучить зависимость скорости вращения, момента, потребляемой мощности и КПД от нагрузки на вал трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Задания:

1. Ознакомиться с устройством и основными техническими характеристиками исследуемого двигателя.
2. Освоить методики экспериментального исследования характеристик асинхронного двигателя.
3. Экспериментально снять рабочие характеристики двигателя: скорость вращения, развиваемый момент, потребляемую мощность и КПД при изменении нагрузки.
4. Проанализировать зависимости механических и энергетических показателей двигателя от нагрузки.

Оборудование и технические средства обучения:

- Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.
- Установка для испытания двигателей (тормозной стенд, тахометр, динамометр, источник питания).
- Ваттметр для измерения потребляемой двигателем мощности.
- Амперметры и вольтметры для измерения токов и напряжений.
- Нагружающее устройство (например, ленточный тормоз или гидравлический нагрузочный).
- Компьютеризированная система сбора данных (при наличии).

Ход работы:

Подготовительный этап:

1. Изучите паспортные данные исследуемого двигателя: номинальную мощность, частоту вращения, ток и напряжение, косинус ϕ , эффективность и др.
2. Ознакомьтесь с конструкцией установки для испытаний двигателя и способами снятия показаний.
3. Включите установку согласно инструкции и убедитесь в её исправности.

Основной этап:

1. Установите минимальную нагрузку на двигатель (начало холостого хода).
2. Замеряйте и зафиксируйте показания приборов:

○ Линейное напряжение U , фазный ток I , потребляемую активную мощность P , частоту вращения n , развиваемый момент M .

3. Постепенно увеличивайте нагрузку на двигатель, фиксируя изменение вышеуказанных параметров каждые 5-10% увеличения нагрузки вплоть до максимальной нагрузки.

4. Повторяйте пункты 2-3 до достижения максимальных значений нагрузки.

Анализ результатов:

1. Оформите таблицы измерений и занесите туда результаты экспериментов.

2. Постройте графики зависимостей:

- Скорости вращения $n=f(P)$;
- Потребляемой мощности $P=f(M)$;
- Эффективности $\eta=f(P)$.

3. Сделайте вывод о характере изменения механических и энергетических параметров двигателя в зависимости от нагрузки.

Требования к оформлению отчета:

Отчет оформляется письменно и должен содержать следующую информацию:

1. Титульный лист с указанием номера и названия лабораторной работы, ФИО студента, группы, преподавателя.
2. Цель и задачи лабораторной работы.
3. Краткую теорию, касающуюся принципов работы асинхронного двигателя и методик эксперимента.
4. Таблицы с результатами измерений.
5. Графики, построенные по результатам исследований.
6. Выводы, содержащие обобщённые заключения о влиянии нагрузки на рабочие характеристики двигателя.
7. Список использованной литературы и нормативных документов.

Оформляйте отчет аккуратно, соблюдая общепринятые правила оформления технической документации.

Контрольные вопросы:

1. Что такое скольжение в асинхронном двигателе и как оно связано с нагрузкой?
2. Почему в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором нельзя мгновенно развить максимальный момент?
3. Как изменяется потребление электроэнергии двигателем при увеличении нагрузки?

4. Какие достоинства и недостатки имеет трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором?

Выполнение лабораторной работы позволит закрепить знания по теме и приобрести практические навыки экспериментального исследования характеристик асинхронных двигателей.

Лабораторная работа №2

Тема: «Реверсивный пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором».

Цель работы: Освоить методику осуществления реверсивного запуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, изучить особенности поведения двигателя при смене направления вращения и сравнить его рабочие характеристики при прямом и обратном движении.

Задачи:

1. Ознакомиться с устройством и схемой управления реверсивным пуском асинхронного двигателя.
2. Исследовать процессы, происходящие в двигателе при запуске в разных направлениях вращения.
3. Получить опыт сборки и настройки реверсивной схемы управления двигателем.
4. Произвести измерения основных параметров двигателя при реверсе и сопоставить их с исходными значениями.

Оборудование и технические средства обучения:

- Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.
- Автоматический выключатель защиты двигателя.
- Реверсивный контактор с кнопочным управлением.
- Ваттметр для измерения потребляемой мощности.
- Амперметры и вольтметры для измерения токов и напряжений.
- Тахометр для измерения скорости вращения вала двигателя.
- Нагружающее устройство (ленточный тормоз или другое).
- Лабораторный стенд с системой управления и питания двигателя.

Ход работы:

Подготовительный этап:

1. Ознакомьтесь с паспортными данными двигателя и элементами управления реверсивными системами.
2. Проследите правильность сборки и подключение силовых цепей двигателя к управляющему оборудованию.
3. Удостоверьтесь в отсутствии коротких замыканий и нарушении изоляции проводов.

Основной этап:

1. Соберите схему реверсивного управления двигателем согласно представленным рекомендациям и руководству пользователя стенда.

2. Настройте систему защиты и блокировки для предотвращения аварийных ситуаций.

3. Осуществите первоначальный запуск двигателя в одном направлении, замеряя начальные значения напряжения, тока, потребляемой мощности и частоты вращения.

4. После остановки двигателя произведите переключение направления вращения (реверс) и вновь проведите измерения указанных параметров.

5. Повторите процедуру несколько раз для подтверждения стабильности результатов.

Анализ результатов:

1. Сопоставьте полученные результаты измерений при запуске двигателя в обоих направлениях вращения.

2. Постройте график зависимости потребляемой мощности от направления вращения.

3. Обратите внимание на различия в величине пусковых токов и моментов при прямом и обратном старте.

4. Сделайте выводы относительно особенностей эксплуатации асинхронного двигателя при реверсировании.

Требования к оформлению отчета:

Отчет выполняется письменно и должен содержать следующую информацию:

1. Титульный лист с названием лабораторной работы, группой и именем исполнителя.

2. Постановку цели и задач лабораторной работы.

3. Подробное описание порядка проведения опыта и выполненных операций.

4. Результаты наблюдений и проведенных измерений в табличной форме.

5. Построенные графические зависимости и дополнительные иллюстрации (при необходимости).

6. Обобщающие выводы по итогам выполненной работы.

7. Список используемой литературы и нормативно-технических документов.

Отчет оформляется грамотно и аккуратно, с соблюдением требований технического стиля.

Контрольные вопросы:

1. Какое условие необходимо соблюдать при осуществлении реверсирования асинхронного двигателя?
2. Почему важно обеспечить защиту двигателя при выполнении реверсивных операций?
3. Как меняются рабочие характеристики двигателя при смене направления вращения?
4. В каких сферах производства применяется реверсивное управление асинхронными двигателями?

Лабораторная работа №3

Тема: «Исследование входных и выходных вольтамперных характеристик биполярного транзистора. Проверка проводимости диода. Изучение работы биполярного транзистора, тиристора».

Цель работы: Исследовать и построить входные и выходные вольтамперные характеристики биполярного транзистора, проверить прямую и обратную проводимость диода, ознакомиться с работой биполярного транзистора и тиристора.

Задачи:

1. Изучить устройство и принцип работы биполярного транзистора и тиристора.
2. Построить и исследовать входные и выходные вольтамперные характеристики биполярного транзистора.
3. Проверить проводимость полупроводникового диода.
4. Научиться собирать и настраивать испытательные схемы.
5. Овладеть навыком обработки и интерпретации экспериментальных данных.

Оборудование и технические средства обучения:

- Универсальный источник питания постоянного тока.
- Набор полупроводниковых компонентов (биполярный транзистор, диод, тиристор).
- Вольтметр и миллиамперметр.
- Осциллограф (для наблюдения процессов).
- Монтажная плата или макетная панель.
- Соединительные провода.

Ход работы:

Часть 1. Исследование входных и выходных ВАХ биполярного транзистора:

1. Соберите схему для измерения входных и выходных характеристик биполярного транзистора.

2. Изменяя напряжение базы транзистора, снимите ряд точек входной характеристики ($I_b = I_b(U_b)$).

3. Затем варьируя напряжение коллектора, получите семейство выходных характеристик ($I_c = I_c(U_{кэ})$) при различных уровнях базового тока.

4. Зарисуйте экспериментально снятые кривые на координатной плоскости.

Часть 2. Проверка проводимости диода:

1. Соберите цепь с диодом и регулируемым постоянным источником питания.

2. Перемещаясь вдоль рабочей ветви вольтамперной характеристики, проверьте наличие прямого и обратного токов.

3. Проверьте, соответствуют ли полученные значения характеристикам выбранного диода.

Часть 3. Изучение работы тиристора:

1. Соберите стандартную схему тестирования тиристора с управляемым ключом и нагрузочной цепью.

2. Проверьте условия открывания и закрывания тиристора изменением угла зажигания.

3. Зарегистрируйте основные режимы работы тиристора (закрит, открыт, удержание состояния).

Требования к оформлению отчета:

1. Титульный лист с номером и темой лабораторной работы, фамилией и инициалами студента, датой выполнения.

2. Цель и задачи лабораторной работы.

3. Краткий теоретический обзор исследуемых объектов и явлений.

4. Схема собранных лабораторных установок.

5. Таблицы с зарегистрированными экспериментальными данными.

6. Графики и рисунки, отображающие входные и выходные характеристики транзистора, режимы работы диода и тиристора.

7. Анализ и обсуждение полученных результатов.

8. Выводы по проделанной работе.

9. Список использованных литературных источников.

Отчет предоставляется в срок, установленный преподавателем, и подлежит защите. Важно внимательно подойти к подготовке графика и таблиц, четко интерпретировать результаты и сделать правильные выводы.

Лабораторная работа №4

Тема: «Исследование входного напряжения однополупериодного и двухполупериодного выпрямителя с помощью осциллографа».

Цель работы:

Ознакомиться с работой и характеристиками однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей, освоить использование осциллографа для

визуализации входного и выходного напряжения, научиться анализировать их формы и сравнивать с теоретическими моделями.

Задачи:

1. Исследовать форму входного напряжения на входе выпрямителей.
2. Изучить работу и характерные особенности однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.
3. Исследовать формы выходного напряжения выпрямленных сигналов.
4. Сделать сравнение реального и теоретически предсказанного выхода выпрямителей.
5. Оценить эффективность выпрямления и степень фильтрации пульсаций.

Оборудование и технические средства обучения:

- Источник переменного напряжения (трансформатор).
- Однополупериодный и двухполупериодный выпрямители.
- Полупроводниковые диоды.
- Осциллограф.
- Миллиамперметр, вольтметр.
- Резистивная нагрузка.
- Соединительные провода.

Ход работы:

1. Подготовка оборудования:

1. Соберите схему для подачи переменного напряжения на вход выпрямителей.
2. Подключите осциллограф к выходу выпрямителей.
3. Подготовьте инструменты для измерения тока и напряжения.

2. Исследование входного напряжения:

1. Подайте переменное напряжение на вход выпрямителей.
2. Используя осциллограф, зарегистрируйте форму входного напряжения и сделайте скриншоты экрана.
3. Запишите численное значение входного напряжения (эффективное и пиковые значения).

3. Исследование работы однополупериодного выпрямителя:

1. Подключите схему однополупериодного выпрямителя.
2. Зарегистрируйте сигнал на выходе выпрямителя с помощью осциллографа.
3. Оцените форму выходного напряжения и степень его искажения по сравнению с формой входного сигнала.
4. Измерьте среднюю величину выходного напряжения и размах пульсаций.

4. Исследование работы двухполупериодного выпрямителя:

1. Подключите схему двухполупериодного выпрямителя.

2. Аналогично предыдущему пункту зарегистрируйте выходной сигнал с помощью осциллографа.

3. Оцените форму выходного напряжения и степень его приближенности к постоянному току.

4. Измерьте среднюю величину выходного напряжения и размах пульсаций.

5. Сравнительный анализ:

1. Создайте таблицу, сравнивающую параметры входного и выходного напряжений для обеих схем выпрямления.

2. Сделайте выводы о преимуществе и недостатках каждого типа выпрямителя.

Требования к оформлению результата лабораторной работы:

1. Титульный лист с названием работы, группой, ФИО студента и датой выполнения.

2. Цель и задачи лабораторной работы.

3. Схематичное представление используемых схем.

4. Описание процедуры измерений и условий проведения эксперимента.

5. Фотографии экранов осциллографа и записи зарегистрированных данных.

6. Таблица с измеренными параметрами и их описанием.

7. Графики выходных напряжений выпрямителей (желательно создать вручную или с помощью программного обеспечения).

8. Вывод о сравнении эффективности однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.

9. Список использованной литературы и пособий.

Отчет по лабораторной работе представляется в письменной форме, подписывается студентом и передается преподавателю для проверки и оценки.

3.4 Контрольная работа

Контрольная работа выполняется обучающимися с целью систематизации, закрепления и расширения теоретических знаний, развития творческих способностей обучающихся, овладения навыками самостоятельной работы с научной, научно-методической, нормативно-правовой литературой, формирования умений анализировать и отвечать на вопросы, поставленные темой работы, делать выводы на основе проведенного анализа.

Основные задачи выполняемой работы:

- закрепление полученных ранее теоретических знаний;
- выработка навыков самостоятельной работы;
- выяснение подготовленности обучающегося к будущей практической работе.

Контрольная работа выполняется в соответствии с методическими рекомендациями к выполнению письменных работ для курсантов (студентов) обучающихся по программам среднего профессионального образования.

Контрольная работа выполняется письменно в аудитории по завершению раздела. Преподаватель проводит консультацию, устанавливает срок выполнения работы, объясняет критерии и систему оценки работы.

Примерные варианты контрольной работы:

Контрольная работа – эффективный инструмент проверки знаний обучающихся по отдельному разделу учебной дисциплины. Она помогает преподавателю объективно оценить уровень усвоения материала, выявить пробелы в знаниях и своевременно скорректировать учебный процесс.

Примерные варианты контрольной работы по разделам:

РАЗДЕЛ 1

Вариант №1

Теоретические вопросы:

1. Что такое активная и реактивная составляющая импеданса? В чем их различие?
2. Почему при включении катушки индуктивности в цепь переменного тока появляется сдвиг фаз между напряжением и током?
3. Объясните принцип действия трансформатора и перечислите основные режимы его работы.
4. В чем заключается обратимость электрических машин?
5. Как выбираются номиналы защитных аппаратов в цепях переменного тока?

Практические задачи:

6. **Задача №1:** Найдите общее сопротивление цепи, состоящей из последовательно включённых резисторов 10 Ом, 20 Ом и параллельно подключённого резистора 30 Ом.

7. **Задача №2:** Катушка индуктивности включена в цепь переменного тока частотой 50 Гц. Ток в цепи равен 2 А, напряжение на катушке составляет 100 В. Вычислите индуктивность катушки.

8. **Задача №3:** Трёхфазный асинхронный двигатель потребляет мощность 10 кВт при напряжении 380 В и коэффициенте мощности $\cos \varphi = 0,8$. Определите силу тока, протекающего через каждую фазу двигателя.

9. **Задача №4:** Одна лампа мощностью 60 Вт и две лампы мощностью 40 Вт каждая включены параллельно в сеть с напряжением 220 В. Найдите общий ток потребления ламп.

Вариант №2

Теоретические вопросы:

1. Объясните принцип действия законов Ома и Кирхгофа в применении к простым и сложным электрическим цепям.
2. Какой физический смысл заложен в параметрах «собственная индуктивность» и «взаимная индуктивность»?
3. Что такое синхронный двигатель и каковы его основные конструктивные особенности?
4. Каковы основные признаки перегрузки трансформатора и каким образом можно предотвратить перегрев?
5. Охарактеризуйте три способа соединения обмоток трёхфазного генератора («звезда», «треугольник»).

Практические задачи:

6. **Задача №1:** Три резистора сопротивлением 5 Ом, 10 Ом и 15 Ом соединены параллельно. Определите общее сопротивление цепи.
7. **Задача №2:** Конденсатор ёмкостью 10 мкФ включен в цепь переменного тока частотой 50 Гц. Через конденсатор протекает ток силой 2 А. Найдите напряжение на конденсаторе.
8. **Задача №3:** Трёхфазный двигатель с симметричной нагрузкой потребляет мощность 15 кВт при напряжении 380 В и коэффициенте мощности $\cos \varphi = 0,85$. Найти силу тока в одной фазе.
9. **Задача №4:** Лампы мощностью 60 Вт, 100 Вт и 40 Вт подключены последовательно к сети с напряжением 220 В. Определите падение напряжения на каждой лампе.

РАЗДЕЛ 2

Вариант №1

Теоретические вопросы:

1. Что такое электронно-дырочный переход и каковы его основные свойства?
2. Какие виды полупроводниковых диодов существуют и где они применяются?
3. Объясните, как работает биполярный транзистор и приведите его классификацию.
4. Опишите принцип действия полевых транзисторов и укажите их основное преимущество перед биполярными транзисторами.
5. В чем заключается работа выпрямителя и какие существуют типы выпрямителей?

Практические задачи:

6. **Задача №1:** Диод имеет пороговое напряжение открытия 0,7 В. Определите величину прямого падения напряжения на диоде при прямом смещении, если приложено напряжение 1,5 В.

7. **Задача №2:** Транзистор включен по схеме с общим эмиттером. Его коэффициент передачи тока $\beta = 100$. Базовый ток составляет 0,1 мА. Определите ток коллектора.

8. **Задача №3:** Предложите схему простого стабилизатора напряжения на основе стабилитрона. Опишите её работу.

9. **Задача №4:** Рассчитайте коэффициент усиления по напряжению для операционного усилителя, работающего в режиме повторителя напряжения.

10. **Задача №5:** Проверьте работоспособность транзистора NPN-транзистора с использованием мультиметра. Последовательно объясните шаги проверки.

Вариант №2

Теоретические вопросы:

Что такое собственный и примесный полупроводник? В чем их отличие?

Перечислите основные классификации полупроводниковых диодов и дайте характеристику каждому типу.

Объясните принцип работы биполярного транзистора и укажите его основные области применения.

Какие существуют типы тиристоров и как они работают?

Зачем нужны стабилизаторы напряжения и как они реализуются на практике?

Практические задачи:

Задача №1: Рассмотрим кремниевый диод с прямым падением напряжения 0,7 В. Определите ток через диод, если к нему приложено напряжение 1,2 В и внутреннее сопротивление диода равно 10 Ом.

Задача №2: Полевой транзистор имеет крутизну 10 мА/В и сопротивление сток-затвор 1 МОм. При подаче управляющего напряжения 3 В определите выходной ток транзистора.

Задача №3: Предложите простую схему однополупериодного выпрямителя и вычислите эффективное значение выходного напряжения, если известно, что амплитуда входного напряжения равна 10 В.

Задача №4: Рассчитайте усиление по напряжению для дифференциального усилителя, если известны значения коэффициентов передачи: $A_1 = +10$ и $A_2 = -10$.

Задача №5: Разработайте последовательность действий для проверки работоспособности биполярного PNP-транзистора с помощью мультиметра.

4. ВОПРОСЫ ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

1. Что такое пассивный элемент электрической цепи?
2. Чем отличаются последовательное и параллельное соединение электроприемников?
3. Дайте определение закона Ома.
4. Объясните закон Кирхгофа для замкнутых контуров.

5. Какие существуют способы соединений резисторов?
6. Приведите формулу баланса мощностей в электрической цепи.
7. Для чего используется потенциальная диаграмма?
8. Как рассчитывается простая электрическая цепь постоянного тока?
9. Опишите метод эквивалентного генератора.
10. Как определить напряжение узла в сложной схеме методом узловых потенциалов?
11. Какой физический смысл имеет магнитная проницаемость?
12. Запишите закон электромагнитной индукции Фарадея.
13. Что называется гистерезисом?
14. От чего зависит величина ЭДС взаимной индукции?
15. Как рассчитываются неразветвленные магнитные цепи?
16. Что является источником электромагнитных сил?
17. Где применяются электромагниты?
18. Обоснуйте энергетику магнитного поля.
19. Укажите отличительную особенность ферромагнетиков.
20. Объясните, почему возникает эффект гистерезиса?
21. Дайте понятие амплитуды и периода синусоидального сигнала.
22. Почему векторные диаграммы удобны для анализа цепей переменного тока?
23. Как влияет активное сопротивление на сдвиг фазы в цепи переменного тока?
24. Когда наступает резонанс напряжений в RLC-цепи?
25. Определите коэффициент мощности цепи переменного тока.
26. Какие преимущества обеспечивает трехфазная система питания?
27. Что представляет собой четырехпроводная система электроснабжения?
28. По какой причине применяется нулевой провод в трехфазных сетях?
29. Какие факторы влияют на мощность трехфазной цепи?
30. Покажите разницу между симметричной и несимметричной нагрузкой.
31. Какие бывают виды погрешностей измерений?
32. Классифицируйте электроизмерительные приборы.
33. Какие устройства используются для расширения диапазона измерений?
34. Опишите принципы работы прибора для измерения сопротивления.
35. Зачем нужны косвенные методы измерения сопротивления?
36. Объясните роль индукционного механизма в приборах.
37. Опишите принцип работы электродинамического измерительного механизма.
38. Что такое калибровка измерительного оборудования?
39. Чем отличается прямое измерение от сравнительного метода?
40. Рассчитайте общую погрешность комбинированного измерения.
41. В чём заключается основной принцип работы трансформатора?

42. Что называют номинальными параметрами трансформатора?
43. Для чего служат автотрансформаторы?
44. Какие потери возникают в работе трансформатора?
45. Объясните работу трёхфазного трансформатора.
46. Как выбрать подходящий тип трансформатора для конкретной цели?
47. Какие особенности имеют измерительные трансформаторы?
48. Какие ограничения накладывает сердечник трансформатора?
49. За счёт чего достигается высокий КПД современных трансформаторов?
50. Приведите классификацию трансформаторов по назначению.
51. Что такое электронно-дырочный переход ("р-п"-переход)?
52. Охарактеризуйте прямой и обратный режимы работы "р-п"-перехода.
53. Какова структура полупроводникового диода?
54. Перечислите основные области применения полупроводниковых диодов.
55. В чем различие между биполярными и полевыми транзисторами?
56. Какие схемы включения характерны для биполярных транзисторов?
57. Какие физические процессы происходят внутри биполярного транзистора?
58. Назовите статические параметры биполярного транзистора.
59. Как устроены полевые транзисторы?
60. В чем заключаются различия между различными видами тиристоров?
61. Нарисуйте схему простейшего однофазного выпрямителя.
62. Какие фильтры используют для сглаживания пульсаций выходного напряжения выпрямителя?
63. Чем различаются LC- и RC-генераторы?
64. Объясните структуру и принцип работы импульсного генератора.
65. Что такое мультивибратор?
66. Назовите основные части стабилизатора напряжения.
67. Как работает трехфазный выпрямитель?
68. Объясните термин "температурный дрейф" применительно к электронной аппаратуре.
69. Какие показатели характеризуют качество стабилизации напряжения?
70. Каково назначение сглаживающих фильтров в источниках питания?
71. Какую основную функцию выполняют электронные усилители?
72. Перечислите основные параметры усилителей низких частот.
73. Что означает отрицательная обратная связь в усилителе?
74. Что такое амплитудно-частотная характеристика усилителя?
75. Объясните влияние температуры на стабильность работы усилителя.

76. Как организована схема однотактного усилителя на биполярном транзисторе?
77. Для чего применяют каскады усиления?
78. Какие требования предъявляются к качеству усилителей звуковых частот?
79. Чем определяется верхняя граница полосы пропускания усилителя?
80. Что такое перегрузочная способность усилителя?
81. Опишите структуру колебательного контура.
82. В чем разница между LC- и RC-генераторами?
83. Для чего предназначены генераторы импульсов?
84. Как работают электронные мультиметры?
85. Назовите виды цифровых измерительных приборов.
86. Объясните, зачем нужен электронный осциллограф?
87. Что представляют собой аналоговые стрелочные вольтметры?
88. В чем отличие цифрового вольтметра от аналогового?
89. Что такое широкополосный генератор?
90. Объясните принцип действия генератора линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН).

5. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБУЧЕНИЯ

Основная литература:

1. Кузовкин, В. А. Электротехника и электроника : учебник для среднего профессионального образования / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 431 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-07727-8. <https://www.biblio-online.ru/book/elektrotehnika-i-elektronika-433843>
2. Миленина, С. А. Электротехника : учебник и практикум для среднего профессионального образования / С. А. Миленина ; под редакцией Н. К. Миленина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 263 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-05793-5. <https://www.biblio-online.ru/book/elektrotehnika-438004>

Дополнительные источники:

3. Алиев И. И. Электротехника и электрооборудование: базовые основы : учебное пособие для среднего профессионального образования / И. И. Алиев. — 5-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2022. — 291 с.
4. Кузовкин В. А. Электротехника и электроника: учебник для среднего профессионального образования / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. — Москва: Издательство Юрайт, 2022. — 431 с.

5. Миленина, С. А. Электротехника, электроника и схемотехника: учебник и практикум для среднего профессионального образования / С. А. Миленина, Н. К. Миленин ; под редакцией Н. К. Миленина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2022. — 406 с.

6. Аполлонский С.М. Основы электротехники. Практикум: учебное пособие для СПО / С.М. Аполлонский. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 320 с. - ISBN 978-5-8114-6707-5. - Текст электронный // Лань: электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/151687> - Режим доступа: для авториз. пользователей.

7. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учебник для СПО / Г. И. Атабеков. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 592 с. - ISBN 978-5-8114-6802-7. - Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/152634> - Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник для СПО / И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.Я. Фролов. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 736 с. - ISBN 978-5-8114-6756-3. - Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/152467> - Режим доступа: для авториз. пользователей.

9. Бычков Ю. А., Золотницкий В. М., Чернышев Э. П., Белянин А. Н. Основы теоретической электротехники: учебное пособие для СПО / - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 592 с. - ISBN 978-5-8114-6888-1. - Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/153656> - Режим доступа: для авториз. пользователей.

10. Потапов Л. А. Основы электротехники: учебное пособие для СПО / Л.А. Потапов. - Санкт-Петербург: Лань, 2021. - 376 с. - ISBN 978-5-8114-6716-7. - Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/151696> - Режим доступа: для авториз. пользователей.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 009B2066B13EC6BD3AC9D4657D6DE2BAFF
Владелец Левкоз Сергей Андреевич
Действителен с 21.02.2025 по 17.05.2026